

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Možnosti zvyšování efektivity frézování

Options for Increasing Milling Efficiency

Student:

Bc. Vojtěch Blaženec

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.

Ostrava 2018

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Vojtěch Blaženec**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Téma: Možnosti zvyšování efektivity frézování
Options for Increasing Milling Efficiency
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor působení sil řezání u základních typů fréz při frézování.
2. Experimentální část se zaměřením na analýzu sil řezání při frézování.
3. Závěry pro realizaci v praxi.

Seznam doporučené odborné literatury:

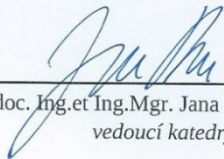
AB SANDVIK COROMANT - SANDIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění - Kniha pro praktiky*. Překl. M. Kudela. 1. vyd. Praha : Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook. ISBN 91-972299-4-6.
BRYCHTA, J.; CZÁN, A.; ČEP, R.; KRATOCHVÍL, J.; PETRŮ, J.; SADÍLEK, M.; STANČEKOVÁ, D.; ZLÁMAL, T. *Progresivní technologie v obrábění a NC programování obráběcích strojů*. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Žilinská Univerzita v Žilině, 173 s., 2014, ISBN 978-80-248-3522-8.
NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. Žilina: EDIS Žilina. 2007, 243s. ISBN 978-80-8070-711-8.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry

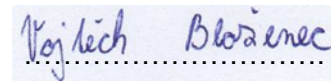



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 21.5.2018

A rectangular box containing a handwritten signature in blue ink. The signature reads "Vojtěch Blošinec". Below the signature is a dotted line.

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uloženu vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 21.5.2018

.....Vojtěch Blaženec

podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Vojtěch Blaženec

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Kledenského 40, Fulnek, 742 45

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

BLAŽENEC, Vojtěch. Možnosti zvyšování efektivity frézování. Ostrava: katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, Fakulta strojní VŠB- Technická univerzita Ostrava, 2018, 63 s. Diplomová práce, vedoucí Sadílek, Marek.

Diplomová práce se zabývá problematikou silových poměrů při frézování drážek různými strategiemi a různými typy upnutí nástroje. Uvodní část se věnuje problematice měření složek řezné síly, rozdělení různých typů dynamometrů atd. Následující část se zabývá rozboru dynamometru Kistler 9129A, jenž byl při experimentu použit. Další část je věnována experimentální úloze, je zde popsán použitý stroje, nástroj a materiál. Závěrečnou částí je zhodnocení experimentu.

ANNOTATION OF THESIS

BLAZENEC, Vojtech. Options for Increasing Milling Efficiency. Ostrava: Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, Faculty of Engineering VSB-Technical University of Ostrava, 2018, 63 s. Thesis, head Sadilek, Marek.

The diploma thesis deals with problems of force ratios in milling of grooves with different strategies and various types of tool clamping. The introductory part deals with the measurement of cutting force components, the distribution of different types of dynamometers, etc. The following section deals with the analysis of the Kistler 9129A dynamometer used during the experiment. The next part is devoted to the experimental task, the used machine, tool and material are described here. The final part is the evaluation of the experiment.

Obsah

Úvod	10
1. Teoretický rozbor působení sil při frézování	11
1.1. Síla řezání.....	12
1.2. Složky síly řezání při čelním frézování	13
2. Měření složek síly řezání a momentů	16
2.1. Nepřímé měření sil a momentů	16
2.2. Přímé měření sil a momentů	16
2.3. Požadavky kladené na dynamometrická měřidla	16
2.4. Základní rozdělení snímačů silového zatížení (dynamometrů)	17
2.5. Typy dynamometrů	18
2.5.1. Mechanické dynamometry.....	18
2.5.2. Hydraulické dynamometry	18
2.5.3. Pneumatické dynamometry	19
2.5.4. Elektrické dynamometry.....	19
2.6. Piezoelektrické materiály	25
2.5.1 Krystalické piezoelektrické materiály	25
2.5.2 Keramické piezoelektrické materiály (piezokeramika).....	26
2.5.3 Piezoelektrické polymery	27
3. Piezoelektrický jev	27
4. Dynamometr KISTLER 9129AA.....	29
4.1. Měřicí aparatura	32
4.2. Možnosti měření řezných sil.....	33
5. Návrh jednotlivých strategií.....	33
5.1. Strategie č. 1 (hřeben)	34
5.2. Strategie č. 2 (lupínky)	34
5.3. Strategie č. 3 (iMachining).....	35
6. Experimentální část	35
6.1. Použité stroje a zařízení.....	36
6.1.1. Stroj	36
6.1.2. Nástroj	37
6.1.3. Upnutí	38
6.1.4. Obrobek.....	40
6.1.5. Dynamometr Kistler 9129A	42
6.2. Průběh experimentu.....	43

6.3.	Analýza silového zatížení	44
6.4.	Obrábění strategií č. 1 (hřeben)	46
6.5.	Obrábění strategií č. 2 (lupínky)	48
6.6.	Obrábění strategií č. 3 (iMachining)	49
7.	Zhodnocení experimentu.....	51
7.1.	Složka síly řezání F_{xM}	51
7.2.	Složka řezné síly F_{yM}	53
7.3.	Složka řezné síly F_{zM}	54
7.4.	Výsledná řezná síla F_v	56
	Závěr	58
	Citace	60
	Seznam příloh	63

Seznam použitých značek a symbolů

Značka	Popis	Jednotka
a	Vzdálenost mezi deskami	[mm]
a_p	Axiální hloubka záběru	[mm]
C	Kapacita kondenzátoru	[F]
ε	Dielektrická konstanta	[-]
f_z	Posuv na zub	[mm]
F	Síla obrábění	[N]
F_{xM}	Složka síly řezání působící v ose X	[N]
F_{yM}	Složka síly řezání působící v ose Y	[N]
F_{zM}	Složka síly řezání působící v ose Z	[N]
F_{ok}	Okamžitá velikost řezné síly	[N]
F_v	Výsledná síla obrábění	[-]
K_p	Piezoelektrická konstanta	[-]
KV	Nárazová práce	[J]
l	Délka vodiče	[m]
M_x	Kroutící moment v ose X	[N·m]
M_y	Kroutící moment v ose Y	[N·m]
M_z	Kroutící moment v ose Z	[N·m]
n	Otáčky vřetene	[ot·min ⁻¹]
P	Odpor vodiče	[Ω]
$P_{už}$	Užitkový výkon	[W]
Q	Velikost elektrického náboje	[C]
R	Řezný odpor	[N]

Re	Mez kluzu	[MPa]
Rm	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
S	Plocha desek	[mm ²]
v_c	Řezná rychlost obrábění	[m·min ⁻¹]
v_f	Rychlost posuvu	[m·min ⁻¹]

Úvod

Vývoj strojírenské výroby jde dopředu mílovými kroky, u vyráběných součástí je vyžadována stále větší tvarová, rozměrová přesnost a takové díly lze vyrábět pouze s kvalitními stroji, nástroji, ale je třeba znát detailně i celý obráběcí proces. S tím souvisí i zavedení různých experimentálních metod v obrábění jako je např. měření složek síly řezání, či jiných parametrů ovlivňující proces obrábění. Vývoj těchto technologií je podmíněn mimo jiné i neustálým snižováním výrobních nákladů za zvýšení produktivity práce. To je ovšem možné jen při dokonalé znalosti všech faktorů, které významným způsobem ovlivňují obráběcí proces. Informace nezbytné k posouzení faktorů během obráběcího procesu, jako je např. trvanlivost, tvorba a teplota třísky atd. Informace o obráběcím procesu lze získat mnoha způsoby. Můžeme vypočítat teoretické hodnoty řezné síly, trvanlivosti nástroje a dalších veličin, které nás mohou zajímat. Další možností je různých použití simulačních programů, kterých je v dnešní době na trhu nespočet a jejich používání je v dnešní době rozšířeno do mnoha odvětví průmyslu. Výhodou je, že dokáží věrně nasimulovat podmínky obrábění. Avšak pro velké množství vstupních hodnot, které je potřeba vyplnit k bezproblémovému pracování simulačního programu se z tohoto měření stává časově velmi náročná záležitost. Navíc firmy vyrábějící tyto software si za něj nechají velmi dobře zaplatit. Posledním, ale zároveň nejpresnějším řešením jsou praktická experimentální měření. Nevýhodou je, že jsou jak časově, ale i finančně náročná, nicméně experimentálním měřením získáme reálná data, která se sice každým měřením mohou mírně lišit, ale i přesto získáme přesnější hodnoty než teoretickými výpočty, či simulací. Při zaměření se na experimentální měření na měření složek řezné síly, tak praktické řešení můžeme provádět několika způsoby. Buďto přímo nebo nepřímo. Oba způsoby měření jsou podrobněji rozebrány v následujících kapitolách.

Pro hodnocení a optimalizaci řezného procesu z hlediska výkonnostního, kvalitativního a ekonomického je nezbytná znalost velikosti, směru a smyslu síly řezání a její změny se změnou parametrů procesu. Síla řezání je důležitým ukazatelem průběhu řezání, která napomáhá porozumět obráběcímu procesu a jednotlivým dějům při něm. [1]

Z energetického hlediska je síla řezání jedním z nejcitlivějších indikátorů výkonu obrábění a podává informaci o celkovém množství vygenerovaného procesního tepla. Znalost velikosti síly řezání (obrábění) a jejího chování během řezného procesu umožňuje finální ekonomicko-optimalizační analýzy výrobních postupů, technologií a volby řezných nástrojů, obráběcích strojů a řezných podmínek. [2]

Cílem práce bylo navrhnout nejvhodnější strategie a upnutí v závislosti na velikost složek síly řezání při obrábění kapes, či drážek.

1. Teoretický rozbor působení sil při frézování

Frézování patří mezi progresivní a vysoce rozšířenou metodu obrábění. Neustálé zlepšování obráběcích procesů je dáno především stále většími požadavky na kvalitu obrábění, rychlost a výkon obrábění. Současný trend vývoje je směřován k vývoji nových, výkonných obráběcích strojů s číslicovým řízením, jež umožňují plynule měnitelný pohyb ve více směrech zároveň (CNC obráběcí stroje). Tyto frézovací obráběcí centra nám umožňujících dosažení vysokých výkonů díky spolehlivým pohonům a vhodným řídicím systémům. Výkonné zařízení není jediným aspektem pro vysokou produktivitu práce. Velmi významnou roli hrají i samotné nástroje, jejichž vývoj nijak nezaostává za vývojem obráběcích strojů. Vývojem samotných řezných nástrojů se zabývá řada firem, mimo jiné i firma Iscar, jejichž monolitní stopkové frézy byly použity při experimentu. Důležitým aspektem řezných nástrojů je jejich trvanlivost, což je doba, po kterou je nástroj schopen efektivním způsobem odebírat třísku. Trvanlivost, lze zvýšit novými chladícími médii, moderně konstruovanými nástroji (vrtáky s vnitřním chlazením), novými řeznými materiály atd.

Každý řezný nástroj zanechává na obrobeném povrchu určité stopy, které vytváří vzhled a funkční vlastnosti dané plochy. Teoreticky dosažitelnou jakost povrchu, které by mělo být za ideálních podmínek dosaženo, lze vypočítat. Skutečný výsledek jakosti povrchu je však ovlivněn mnoha faktory obráběcího procesu. Těmito nejčastějšími faktory jsou druh obráběcího procesu, stupeň opotřebení bříty a statické a dynamické tuhosti celého systému (stroj, nástroj, obrobek a upínání). Hlavním faktorem, ovlivňujícím obrábění kovů je stabilita. Jestliže obráběcí proces není stabilní, doprovází obráběcí proces velké vibrace a tyto skutečnosti se následně nepříznivě projeví na výsledném povrchu. Nestabilita procesu může být způsobena:

- špatným technickým stavem obráběcího stroje,
- příliš velkým vyložení vřetene,
- upnutí obrobku (obrobek by měl být upnut s ohledem na smysl a velikost řezných sil při obrábění),
- nevhodná volba nástroje,
- posuv na zub,
- hloubka řezu (je vhodné zvolit obrábění do několika záběrů),
- řezná rychlost.

Při frézovacích operacích odřezává každý zub krátké třísky proměnlivé tloušťky. Vlivem nestejnomyšlnosti průřezu třísky dochází k dynamickému rozvoji silového zatížení. Znalost silového zatížení nástrojů pak sehrává důležitou roli v rozeznávání oblastí negativně, či pozitivně ovlivňující řeznou část nástroje, a tím jeho trvanlivost a celkovou životnost. Umožňuje nám získat přehled o mechanickém namáhání soustavy obrábění, a tím i podklady pro řešení celé technologické soustavy jak z hlediska pevnosti, tak i její tuhosti včetně dynamické stability řezného procesu. Dále je možné získat podklady pro určení příkonu obráběcího stroje, zajištění energetické účinnosti řezného procesu i posuzování jeho tepelných jevů. Velmi významnou veličinou procesu řezání je síla obrábění (řezání), kterou je nutno chápat jako veličinu časově proměnnou. [3]

Určování silového zatížení se nejčastěji provádí pomocí přímého měření v průběhu vlastního řezného procesu. I když se jedná o náročnější a nákladnější metodu, lze takto získat vysoce přesné hodnoty, z kterých lze dále optimalizovat celý výrobní proces. Znalost velikosti řezné síly nám pomáhá sledovat silový průběh při použití povlakovaných či nepovlakovaných nástrojů, sledovat vliv řezných kapalin na proces obrábění atd. Ze silového zatížení lze dále určit obrobitelnost materiálů, s tím související trvanlivost, opotřebení řezného nástroje apod. Dokonalé znalosti těchto oblastí nám napomáhají k určení optimálních pracovních podmínek, jež zajistí rovnováhu mezi hospodárností výroby a nízkými složkami řezné síly, což je při efektivním obrábění kovů prioritou.

1.1. Síla řezání

Síla řezání je dynamický jev. Síla nejdříve roste, až po určité maximum, kdy se ze základního materiálu začne oddělovat materiál ve formě třísek. Po oddělení třísky řezná síla poklesne a celý proces se opakuje. Znalost složek řezné síly při obrábění kovů má jak teoretický, tak praktický význam. Praktické poznatky se uplatňují především při konstruování nástrojů, výpočtech, či konstrukci obráběcích strojů. Teoretické znalosti síly řezání přispívají k upřesnění teorie o řezných procesech. Samotné měření složek řezné síly, se provádí pomocí dynamometrů různých druhů a konstrukcí. [4]

1.2. Složky síly řezání při čelním frézování

Stav napjatosti v obráběném materiálu způsobuje řezný odpor R , který síla řezání (obrábění) musí při řezném procesu neustále překonávat. Síla řezání je silou, kterou působí nástroj na obrobek. Řezný odpor je naopak silové působení obrobku na nástroj. Při obrábění kovových materiálů je břit nástroje vtlačován velkou silou do materiálu obrobku. Aby došlo k oddělení materiálu ve formě třísky, musí řezná síla řezný odpor neustále překonávat. Přičemž platí podmínka rovnováhy (1):

$$F = - R \quad [N] \quad (1)$$

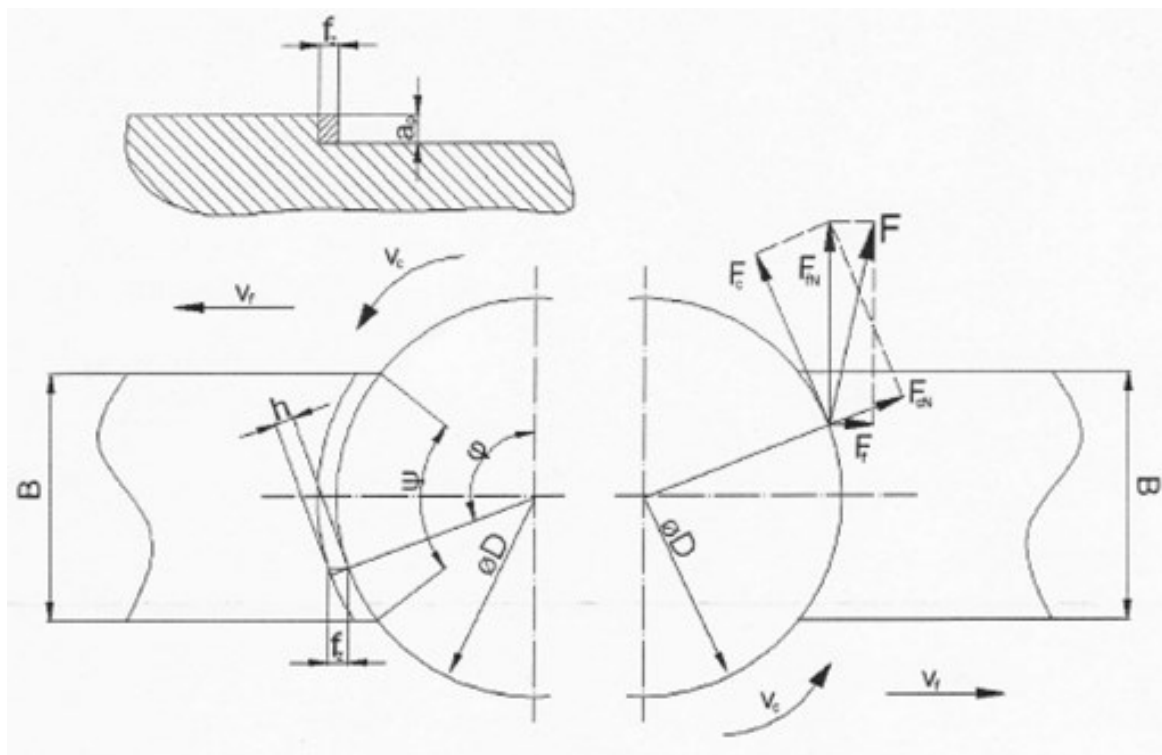
Při frézování je nutné vzhledem k dynamice procesu určit odpovídající rychlost záznamu realizaci vyhotovení dle okamžité polohy břitu nástroje.

Určování řezných sil při frézování je podstatně složitější než u ostatních metod obrábění. Při frézování se mění průřez třísky, což vede k výrazné změně složek síly řezání. Výsledná řezná síla je součtem elementárních sil, kterými působí na obrobek jednotlivé zuby. Mimo to se mění i orientace řezné síly. Velikost síly frézování závisí na počtu zubů v záběru a na jejich okamžité poloze. Výsledná síla je potom součtem řezných sil od jednotlivých současně zabírajících zubů [5].

Opracovaný povrch splňovat dané kvalitativní požadavky. Jak již bylo zmíněno v úvodu, složky síly řezání úzce souvisí s obrobitelností materiálů. Velkou měrou se podílí na spotřebě energie při samotném obrábění. Velká velikost síly řezání znamená velký výkon stroje, který je omezen parametry daného obráběcího stroje. Větší velikost síly řezání má za následek také větší deformace řezného nástroje i obrobku, což je nežádoucí. Výsledkem toho mohou být vibrace a deformace obrobku. To se nepříznivě projeví na kvalitě obrobeného povrchu a životnosti nástroje.

Geometrie nástroje je při zkoumání nesmírně důležitá, jelikož značně ovlivňuje velikost složek řezné síly. Při vnikání nástroje do materiálů dochází ke vzniku řezného odporu. Síly rozložené na celém břitu v axiálním směru, způsobují deformaci nástroje. To, že je nástroj deformován, poznáme podle obrobeného povrchu, na němž se vyskytuje rozměrová chyba. Řezné síly a odpory nejsou v průběhu obrábění stejné, což je zřejmé i z naměřených hodnot experimentální úlohy. Tato změna je zapříčiněna nekonstantním průřezem třísky, ale také např. opotřebením nástroje, nehomogenitou obráběného materiálu či změnou původních vlastností obráběného materiálu atd. [6, 7]

Při určování řezných sil při frézování je nutno vycházet ze záběru jednoho břitu. Obr. 1 zobrazuje silové působení při sousledném a nesousledném čelním frézování. Výsledná řezná síla F (F_v) je tvořena třemi složkami, které jsou navzájem kolmé a leží v souřadných osách X , Y , Z . Jednotlivé složky síly řezání se v průběhu jedné otáčky periodicky mění.



Obr. 1 - Schéma složek řezné síly při čelním frézování [30]

Transformací do souřadného systému dle ČSN ISO 3002, lze vyjádřit celkové síly působící na řezný nástroj (obrobek) a to v různě orientovaných souřadných kartézských systémech:

- souřadný systém řezného nástroje (F_c , F_{cN} , F_p);
- **souřadný systém obráběcího stroje (F_{xm} , F_{ym} , F_{zm});**
- souřadný systém měřicí aparatury Kistler (F_x , F_y , F_z);
- nebo souřadný systém uvažující bod ostří a ortogonální rovinu hlavního ostří (F_{sh} , F_{shN} , F_{tr}).

Při experimentální úloze bude použita transformace do souřadného systému stroje. Výslednou sílu působící v tomto souřadném systému lze rozložit na axiální složku F_{xM} , která je rovnoběžná se směrem rychlosti posuvu. Radiální složka F_{yM} je kolmá na osu na osu rotace nástroje (při frézování, vrtání) a způsobuje vzájemné odtlačování nástroje a obrobku tangenciální složka F_{zM} je tečná na směr hlavního řezného pohybu. Vzájemný vztah složek je dán rovnicí (2): [23]

$$F_v = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad [\text{N}] \quad (2)$$

Vzájemný poměr jednotlivých složek řezné síly je proměnný a je závislý na geometrii břitu nástroje. Pro úhel nastavení hlavního ostří $\chi = 45^\circ$ bývá poměr jednotlivých složek v průměru $F_x : F_y : F_z = 1 : 2 : 4$. Největší významná složka F_z , která určuje s dostatečnou přesností velikost kroutícího momentu u rotačního způsobu obrábění (soustružení, frézování, vrtání) a spolu s řeznou rychlostí určuje příkon elektromotorů obráběcího stroje potřebný k obrábění (3): [23]

$$P_{už} = F_z \cdot v_c \quad [\text{W}] \quad (3)$$

Velikost složek síly řezání nejvíce ovlivňuje zejména materiál obrobku, geometrie nástroje a použité řezné podmínky. Obráběný materiál sílu řezání ovlivňuje největší měrou a platí zde jednoduché pravidlo: čím tvrdší obrobek, tím je větší řezný odpor a samozřejmě i složky řezné síly jsou větší. Velikost silových složek lze ovlivnit i geometrií nástroje, nejvíce pak úhlem čela (čím je řezná hrana nástroje ostřejší, tím budou složky síly řezání nižší). Čím menší bude úhel čela (ostřejší řezná hrana), tím více se sníží složky síly řezání. Nicméně příliš ostrá hrana (pozitivní úhel čela) představuje vysoké riziko vylomení řezné hrany.

2. Měření složek síly řezání a momentů

2.1. Nepřímé měření sil a momentů

Nepřímé měření složek síly řezání vychází především z pozorování reakcí stroje během obráběcího procesu. Vychází se z výkonu elektromotoru. Nepřímým měřením je možné určit pouze tangenciální složku síly řezání, což je zřejmé ze vzorce pro výpočet užitečného výkonu (3):

Podle tohoto vztahu lze snadno vypočítat tangenciální složku řezné síly. Výhodou této metody je nenáročnost na vybavení a lze ji použít u všech druhů obrábění, nicméně přesnost měření je spíše informativní. Nepřesnost měření je způsobena nuceným vynecháním zbývajících složek řezné síly, rozdílnou účinností stroje při zatížení a chodu naprázdno a dalšími faktory. [7]

2.2. Přímé měření sil a momentů

Přímé měření řezných sil a od nich se odvíjejících točivých momentů se provádí pomocí dynamometrů. Princip měření spočívá v měření deformací v soustavě stroj-nástroj-obrobek během obrábění. Dynamometr je přístroj, s jehož pomocí můžeme měřit dynamické síly, vznikající při třískovém obrábění. [12]

Na těleso dynamometru je upnut buďto obrobek (frézování, vrtání, hoblování...) nebo nástroj (soustružení). Dynamometr reaguje při zatěžování vytvářením elektrického signálu. Velikost tohoto signálu je odpovídá velikosti působící síly.

2.3. Požadavky kladené na dynamometrická měřidla

- **Tuhost dynamometrů** je dána velikostí zatěžující síly F , která způsobí deformaci y . Velikost této deformace závisí na tvaru a provedení deformačního elementu – čidla, na celkovém konstrukčním provedení dynamometru i na použité měřicí metodě. Dostatečná tuhost dynamometru je zásadní při měření dynamickém. [3]

- **Citlivost dynamometrů** souvisí s citlivostí použité měřicí metody i s tuhostí konstrukčního provedení dynamometru. Dynamometr musí mít takovou citlivost, že nejmenší odečítaná jednotka při dodržení dostatečné přesnosti odečítaná odpovídala celkové hodnotě měřené veličiny. [3]
- **Stálost údajů dynamometrů** je závislá na tuhosti, citlivosti a přesnosti od stanovení nulové polohy až po zachycení údajů o sledované veličině, a to po celou dobu měření. [3]
- **Reprodukovatelnost údajů** dynamometrů úzce souvisí s výše uvedenými charakteristikami. [3]
- **Setrvačnost dynamometrů** závisí přímo úměrně na hmotnosti soustavy. Zejména při dynamických měřeních, kdy je nesmírně nutné sledovat jak skutečné hodnoty maximálních a minimálních hodnot měřené síly řezání, tak i její časový průběh, by měla být setrvačnost co možná nejmenší. [3]
- **Konstrukce dynamometrů** musí zajistit, aby se složky řezné síly vzájemně neovlivňovaly. [3]

2.4. Základní rozdělení snímačů silového zatížení (dynamometrů)

Dynamometry můžeme rozdělit do 3 skupin podle následujících kritérií:

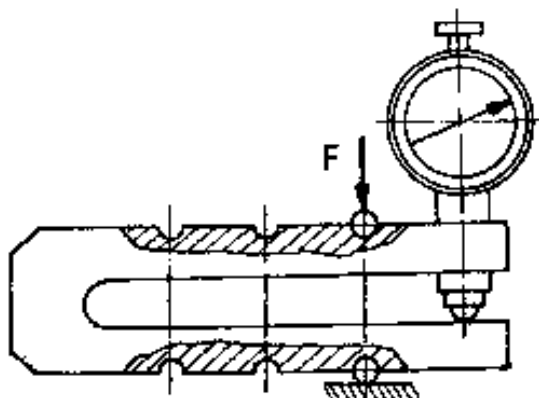
- **Podle počtu měřených složek řezné síly** – dynamometry jednosložkové, dvousložkové, třísložkové a pro měření kroutících momentů. [3]
- **Podle aplikované měřicí metody** (způsob přenosu působení síly z deformačního členu na indikační) – dynamometry mechanické, hydraulické, pneumatické, elektrické (indukční, kapacitní, odporové, využívající piezoelektrického jevu), optické atd. [3]
- **Podle metody obrábění** – dynamometry pro soustružení, frézování, vrtání, broušení, hoblování... Případně dynamometry univerzální. [3]

2.5. Typy dynamometrů

2.5.1. Mechanické dynamometry

Díky své konstrukci se řadí mezi nejjednodušší měřící zařízení. Jsou složeny z kovového prstence nebo třmenu, úchylkoměru a z kovového válečku, na který v jeho podélné ose působí síla. Výhodou je již zmíněná jednoduchá konstrukce a spolehlivost zařízení. Nevýhodou je malý rozsah měření, závislost na změně teplot, velká setrvačnost systému, díky němuž není možné mechanické dynamometry použít pro dynamická měření.

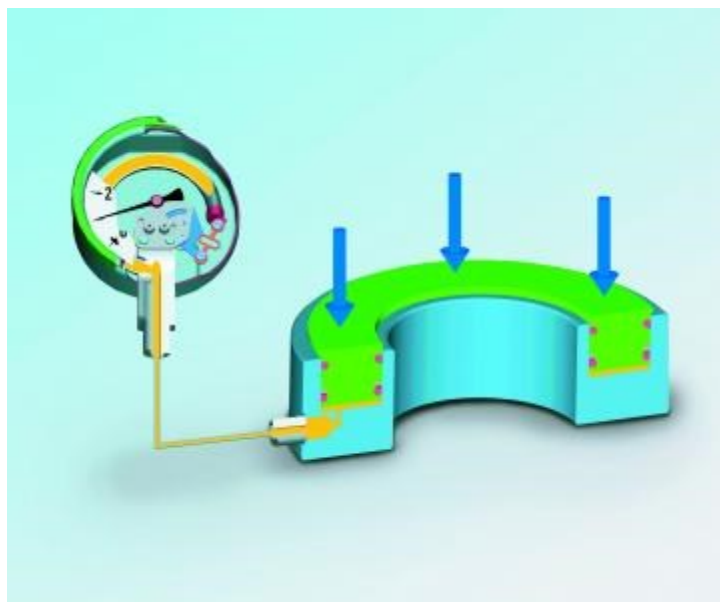
U mechanických dynamometrů se působení síly přenáší přímo nebo znásobené mechanickým převodem na měřící prvek, jako je například číselníkový úchylkoměr. O velikosti síly se usuzuje z deformace siloměrných pružin, kroužků, třmenů, nosníků, membrán, případně podle hloubky vtlačení kuličky do materiálu o známé tvrdosti. Hlavními představiteli této skupiny dynamometrů jsou dynamometry třmenové, viz obr. 2 pro zatížení do 10 kN a dynamometry prstencové. [12, 3]



Obr. 2 - Mechanický dynamometr třmenový [3]

2.5.2. Hydraulické dynamometry

Jedním ze základních způsobů měření síly je jednoduchý princip měření hydraulického tlaku. Síla je pak vyhodnocena z naměřeného tlaku a známé velikosti plochy. Výhodou tohoto měření je, že může autonomně pracovat i bez přívodu energie a může být dodán s přípravky, které umožňují demontáž snímače i pod tlakem, bez zastavení stroje a úniku hydraulické kapaliny snímače. Mezi další výhody patří jednoduchá konstrukce a možnost měření více složek současně. Nevýhodou je naopak nízká citlivost požadavky na dokonalé utěsnění systému a velká setrvačnost. [8, 3]



Obr. 3 – Hydraulický snímač síly [8]

2.5.3. Pneumatické dynamometry

Princip je založen na dynamických vlastnostech vzduchu. Zatěžující síla působící na jedné straně pístu nebo membrány z pružného materiálu je vyvažována tlakem vzduchu z druhé strany. Toto působení protitlaku je snímáno manometrem a je přímo úměrné zatěžující síle. Snímací zařízení se skládá z utěsněné komory s ventilem. Vzduch je pod tlakem přiváděn do komory, dokud nedojde k rovnováze sil. Po dosažení této rovnováhy může být přečten údaj tlaku na tlakoměru. Předností je snadná obsluha a údržba, vysoká spolehlivost a citlivost v porovnání s elektrickými způsoby a relativně nízké náklady na pořízení a provoz. [3, 9]

2.5.4. Elektrické dynamometry

Jsou jedny z nejrozšířenějších a nejpoužívanějších v technické praxi. Mezi hlavní výhody elektrických dynamometrů patří: [3]

- snadný přenos dálkového signálu
- možnost snímání signálů při rotujících a pohybujících se součástech
- využití miniaturních měřících elementů
- snadná dostupnost napájecích zdrojů a čistota provozu

Dle způsobu mechanicko-elektrické transformace rozlišujeme dva základní systémy elektrických dynamometrů: [3]

- **systémy parametrické**, které jsou založeny na změně jednoho parametru elektrického obvodu, L-indukčnosti, C-kapacity, R-odporu
- **systémy generátorové**, které jsou založeny na vzniku proudu nebo napětí při deformaci elementů. Podstatou může být i mimo jiné piezoelektrický jev

Podrobnější dělení elektrických dynamometrů:

a) Elektrické dynamometry indukční

U tohoto typu dynamometrických měřidel působí síla na elastický člen dynamometru. V elektrických indukčních dynamometrech se převážně používají snímače pracující s malou vzduchovou mezerou. Působením zátěžové síly se mění šířka vzduchové mezery, tím se mění impedance magnetického obvodu a v důsledku toho i indukčnost cívky. Tato změna odpovídá danému silovému zatížení. [3, 9]

b) Elektrické dynamometry kapacitní

U těchto dynamometrů se využívá pro měření velikosti deformace změny kapacity snímačů. Při silovém zatížení zde dochází k mechanicko-elektrické transformaci, stejně tak jako u elektrických indukčních dynamometrů. Snímač se obvykle skládá ze dvou proti sobě uložených, dielektrikem oddělených paralelních desek, tvořících kondenzátor, spojených s elastickým elementem. Deformací tohoto snímače dochází k přibližování nebo oddalování desek kondenzátoru, to má za následek změnu jeho kapacity. Deskový kondenzátor je nejjednodušším kapacitním snímačem, jeho kapacita C se dá stanovit dle vztahu (4):

$$C = \varepsilon \cdot \frac{S}{a} \quad [\text{F}] \quad (4)$$

Pro experimentální studium dynamiky rezného procesu se však používá výhradně kapacitních snímačů pracujících s proměnnou vzdáleností mezi deskami či elektrodami. Mezi hlavní výhody této metody patří malá hmotnost a velká citlivost. Mezi nevýhody

patří citlivost vůči okolním vlivům a náročnost na měřicí techniku, proto se tento způsob měření používá jen velmi ojediněle. [10]

c) Elektrické dynamometry odporové

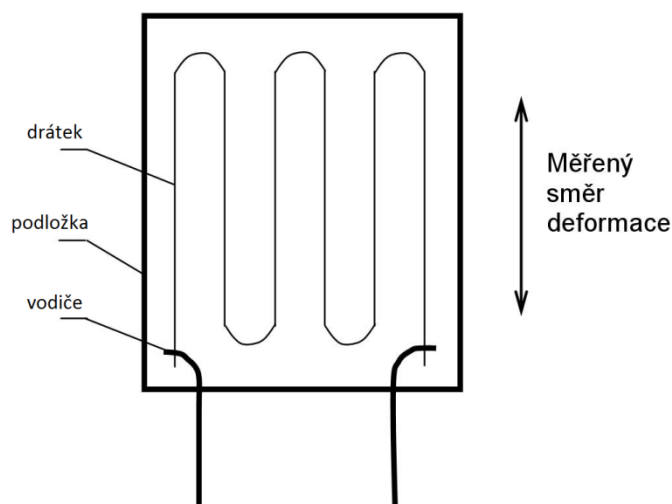
U elektrických odporových dynamometrů se využívá pro měření velikosti deformace změny odporu snímačů. Jedním z nejpoužívanějších typů snímačů je odporový tenzometrický dynamometr, který se svými vlastnostmi hodí pro velmi přesná měření. Princip je založen na měření změny ohmického odporu v závislosti na elastické deformaci kovových vláken tenzometru. Odporový tenzometr se deformuje spolu s deformačním elementem, neboť je s tímto elementem pevně spojen. [3] Při měření deformace se využívá následujícího vztahu (5):

$$P = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad [\Omega] \quad (5)$$

Nejpoužívanějším odporovým materiálem u kovových tenzometrů je konstantan (slitina Cu-Ni) s velkým měrným odporem a hodnotou součinitele deformační citlivosti $k=2$. Podle technologie výroby se dělí kovové tenzometry na drátkové, fóliové a napařované. [3]

d) Drátkové tenzometry

Tento typ dynamometrů má měřicí mřížku z odporového drátu o průměru 0,01 až 0,05 mm nalepenou na tenkou izolační podložku z papíru nebo z pryskyřice. K měřicí mřížce jsou připájeny měděné a postříbřené přívodní dráty. Drátkový tenzometr je potom přilepen na místo snímání deformace speciálním acetátovým nebo pryskyřicovým lepidlem. Měřicí mřížka může mít i tvar spirály, která je vetkaná do základového materiálu z umělého hedvábí nebo skleněné tkaniny. Odporový drátkový tenzometr je zobrazen na obr. 4. [8, 3]



Obr. 4 Schéma drátkového tenzometru [11]

Drátkové odporové tenzometry mají malý rozptyl hodnoty odporu, součinitele deformační citlivosti i teplotních součinitelů. Tyto skutečnosti mají velký význam pro vyloučení rušivých vlivů při současném měření větším počtem tenzometrů. Z těchto důvodů je použití drátkových tenzometrů při dynamickém měření sil nejrozšířenější. [3,11]

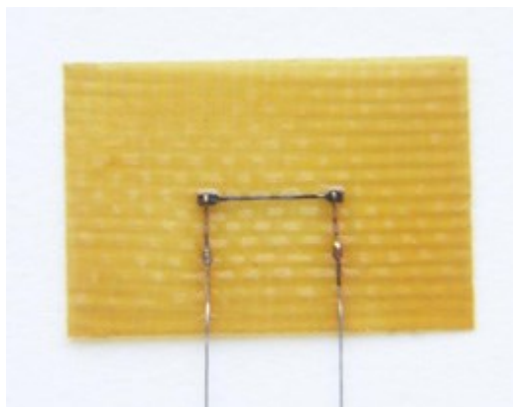
e) Fóliové tenzometry

Fóliové tenzometry se liší od drátkových tenzometrů technologií výroby. Měřicí mřížka je vytvořena z tenké fólie o tloušťce asi 0,012 až 0,015 mm. Požadovaný tvar měřicí mřížky je vyroben fotochemickou cestou, která je analogická metodě výroby tištěných spojů. Výhodou fóliových tenzometrů je jejich necitlivost vůči stranovým namáháním, poměrně velké přípustné zatížení proudové s ohledem na velké ochlazovací plochy a možnost vytvoření libovolného tvaru tenzometru. Fóliové odporové tenzometry se dále vyznačují dokonalejším spojením měřicí mřížky se základní fólií i lepšími podmínkami pro převod deformace na mřížku. Jsou proto v porovnání s odporovými tenzometry drátkovými přesnější a stabilnější. [3]

f) Polovodičové tenzometry

Postupem času se dospělo k vytvoření polovodičových tenzometrů (viz obr. 5). Tento druh tenzometrů je tvořen páskem vyříznutým z monokrystalu polovodiče (např. křemík, germanium). Mají až 60x větší citlivost oproti kovovým tenzometrům. Princip elektrických polovodičových tenzometrů je založen na piezoelektrickém jevu.

Polovodičové tenzometry rozlišují oblast použití odporové tenzometrie. Jejich výroba je ale velmi pracná a tedy i nákladná. S tímto bezprostředně souvisí i vysoké ceny těchto polovodičových tenzometrů. [7]



Obr. 5 – Polovodičový tenzometr [13]

g) Napařovací tenzometry

Dalším pomyslným vývojovým stupněm v odporové tenzometrii jsou tzv. napařovací tenzometry. Smyslem napařovacích odporových tenzometrů je postupné napařování jednotlivých vrstev přímo na měřené místo deformačního elementu. Napařování umožňuje vyrobit snímač velmi malých rozměrů a tloušťky, viz obr. 6. Jednotlivé vrstvy se postupně nanášejí na vyleštěné měřené místo. První nanesenou vrstvou je vrstva izolační, potom vrstva pro spojovací a pájecí sekci a nakonec v požadovaném uspořádání vrstva odporová. Po dokončení se snímač pokryje ochrannou vrstvou. [7, 8]



Obr. 6 – Napařovací tenzometr [8]

h) Piezoelektrické dynamometry

Piezoelektrické systémy měření síly jsou značně odlišné od jiných metod měření. Tento typ dynamometrů můžeme zařadit mezi nejpoužívanější zařízení detekující silové zatížení s širokým spektrem využití. Piezoelektrického principu využívá i dynamometr Kistler 9129A, který byl použit k experimentální úloze. Z tohoto důvodu se piezoelektrickému jevu věnují i následující kapitoly. Pro snímání deformace se využívá tzv. piezoelektrického jevu, který je reakcí na silové zatížení. Podmínkou vzniku tohoto jevu je piezoelektrický materiál, kterým je např. křemen. Krystalické výbrusy produkují elektrický náboj pouze tehdy, když zaznamenávají změnu zatížení, tzn., že síly působící na krystal křemene jsou převedeny na proporcionální elektrický náboj. Velikost vzniklého náboje lze pak určit podle následujícího vztahu (6):

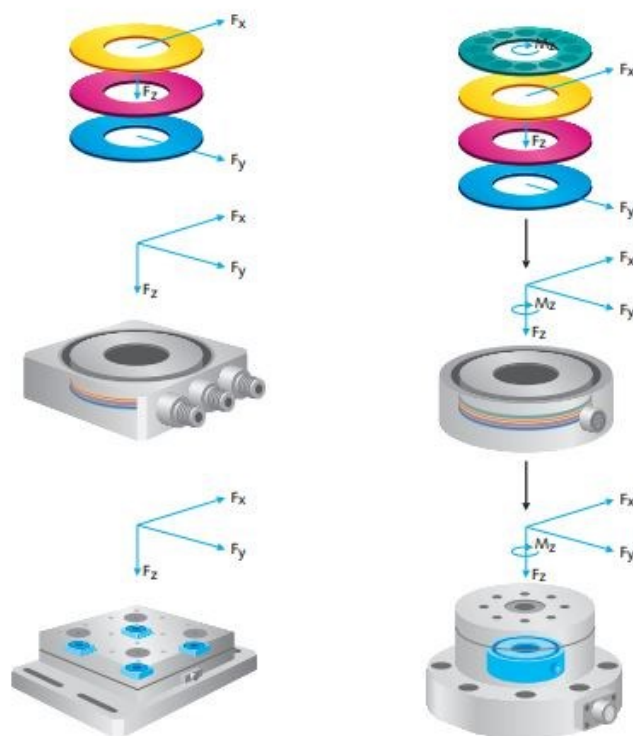
$$Q = k_p \cdot F \quad [C] \quad (6)$$

Tělo piezoelektrických dynamometrických snímačů tvoří ocelové, korozivzdorné tělo, do kterého jsou vloženy výbrusy z piezoelektrického materiálu, nejčastěji křemene. Na obr. 7 lze vidět jak základní materiál, tak i výbrusy z něj zhotovené.



Obr. 7 – Piezoelektrický materiál [15]

Výbrus (kotouč nebo deska), je vyříznut v určité ose krystalu a orientace jednotlivých os se shoduje s osami naměřených složek síly. Každý výbrus snímá jednotlivé složky silového zatížení zvlášť. Počet vložených výbrusů v těle dynamometru se může lišit. Podle množství výbrusů rozlišujeme dynamometry jednokomponentní - měřící jednu složku zatížení a vícekomponentní - měřící více složek najednou, obr. 8. [15, 16, 17]



Obr. 8 – Konstrukce 3-komponentního (vpravo) a 4-komponentního dynamometru (vlevo) [18]

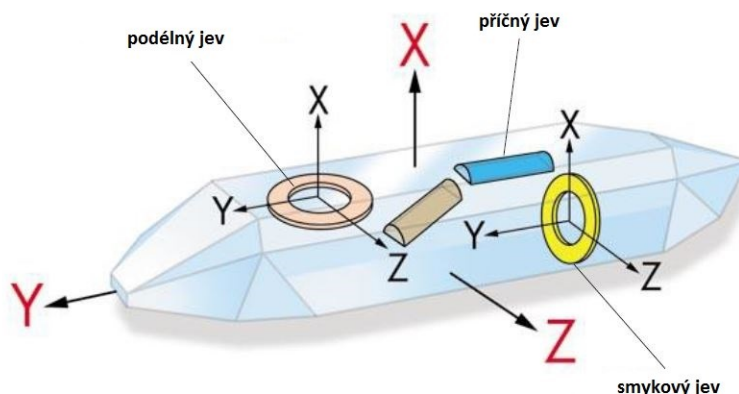
2.6. Piezoelektrické materiály

Piezoelektrické materiály patří do skupiny dielektrických materiálů ze spontánní elektrickou polarizací. Už velmi malé namáhání vyvolá u těchto materiálů polarizaci, která je způsobena posunem center dipólů, tvořených anionty a kationty. Průmyslové využití těchto materiálů se datuje od 50. let minulého století. Nyní se vědci snaží o další vývoj piezoelektrických materiálů s lepšími piezoelektrickými vlastnostmi, lepší tepelnou stabilitou, s větší účinností přeměny elektrické a mechanické energie atd. Piezoelektrické materiály používané v praxi lze rozdělit do 3 skupin.

2.5.1 Krystalické piezoelektrické materiály

Základním rysem krystalů je jejich uspořádání atomů, iontů nebo molekul do krystalové mřížky. Mezi hlavním představitelem je krystal křemene, který se objevuje jak v přírodní, tak i v syntetické formě. Křemen je díky svým vlastnostem se nejpoužívanějším piezoelektrickým materiálem. Dalšími zástupci krystalických piezoelektrických materiálů jsou např.: lithium tantalát, berlinit, sirník kademnatý, oxid zinečnatý. Z krystalů jsou řezány a broušeny jednotlivé výbrusy. Před samotným řezáním výbrusů je nutné zjistit pomocí rentgenového goniometru orientaci krystalových

os, viz obr. 9. Uvnitř dynamometru firmy Kistler, který byl použit při experimentu jsou ukryty rovněž výbrusy z krystalu. [16, 17]



Obr. 9 – Orientace krystalových os u křemene [19]

2.5.2 Keramické piezoelektrické materiály (piezokeramika)

Historie keramickým piezoelektrických sahá až do poloviny minulého století. Jedná se o umělé vyrobené látky, s výbornými piezoelektrickými vlastnostmi. Za piezoelektrickou keramiku lze označit látky na bázi tuhých roztoků oxidů titanu, zirkonu a olova. Piezoelektrická keramika je vyráběna stejně jako např. vyměnitelné břitové destičky práškovou metalurgií. Pro přípravu piezoelektrické keramiky, je použito jemných prášků složených oxidů kovů, ty jsou následně smíchány s organickým pojivem. Poté jsou tvarovány do konstrukčních prvků majících požadovaný tvar (kotouče, tyče, desky atd.) Následuje vypálení směsi v peci a po vychladnutí je vše řezáno a broušeno do požadovaných tvarů, jak je vidět na obr. 10. Využití nachází tyto materiály především jako rezonátory v ultrazvukové technice. [17, 20, 21]



Obr. 10 – Rozmanitost tvarů keramických výbrusů [22]

2.5.3 Piezoelektrické polymery

Dalším zástupcem piezoelektrických materiálů jsou piezoelektrické polymery. Základním podmínkem ke zkoumání těchto látek bylo objevení piezoelektrických vlastností v polymerní látce – polyvinylidendifluoridu a difluoropolyetylenu, koncem šedesátých let minulého století. Polymery vynikají oproti keramikám vyšší ohebností. Společně s elektrety se používají jako membrány mikrofónů. Objevují se také ve spojení s piezoelektrickými kompozity, kde je využito vlastností obou materiálů. Kompozity se nejčastěji připravují ve formě tyčinek, destiček či zrn piezoelektrické složky v polymerní matrici. [17, 21]

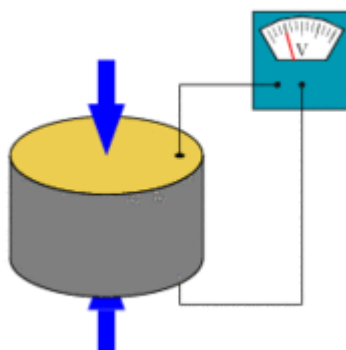
3. Piezoelektrický jev

Historie zkoumání Piezoelektrického jevu je spojena s rokem 1880, kdy bratři Curieové prováděli experimenty na krystalech několika materiálů. Zjistili, že při mechanickém namáhání vykazují krystaly přímý piezoelektrický jev. O rok potvrdili existenci "obráceného jevu" – nepřímého piezoelektrického jevu. [21, 24, 33]

Původ slova pochází z řeckého *piezein* – tlačit. Je to schopnost krystalu generovat elektrické napětí při jeho deformování. Vyskytuje se pouze u krystalů, které nemají střed symetrie. Nejznámější piezoelektrickou látkou je monokrystalický křemen, křišťál. Opačný jev, kdy se krystal ve vnějším elektrickém poli deformuje, se nazývá elektrostriktce. [25, 33]

Díky piezoelektrické můžeme pomocí krystalů přeměnit mechanickou energii na elektrinu nebo naopak. Princip spočívá v tom, že na plochách určitých krystalů se po jejich mechanickém namáhání vytvoří elektrický náboj (obr. 11). Jestliže se toto na povrchu krystalu uskuteční, pak tuto změnu nazýváme přímý piezoelektrický děj. Platí

zde přímá úměra, tzn. čím více krystal stlačíme, tím větší bude vygenerovaný náboj. Velikost náboje je závislá pouze na velikosti ploch krystalu. V praxi se krystal stává druhem jakési malé baterie s pozitivním nábojem na jedné straně a negativním nábojem na opačné straně. Proud teče, pokud spojíme dvě plochy dohromady, tím získáme elektrický obvod.



Obr. 11 – Princip piezoelektrického jevu [26]

V opačném případě nastane piezoelektrický efekt nepřímý. Ten je charakterizován tím, že je krystal mechanicky namáhán, až po zapojení napětí na protilehlých stranách krystalu. Na rozdíl od přímého elektrického jevu, kde je závislost lineární, je u nepřímého piezoelektrického jevu závislost kvadratická.

K piezoelektrickému jevu nedochází při působení vysokých teplot, důvodem je narušení uspořádání iontů v krystalové mřížce. K této změně dochází skokově, jedná se tedy o fázový přechod, kdy daný materiál nepřekročil kritickou teplotu a stále disponuje piezoelektrickými vlastnostmi. Při překročení kritické teploty ztrácí materiál piezoelektrické vlastnosti. Kritická teplota identická pro každý materiál se nazývá Curieova teplota.

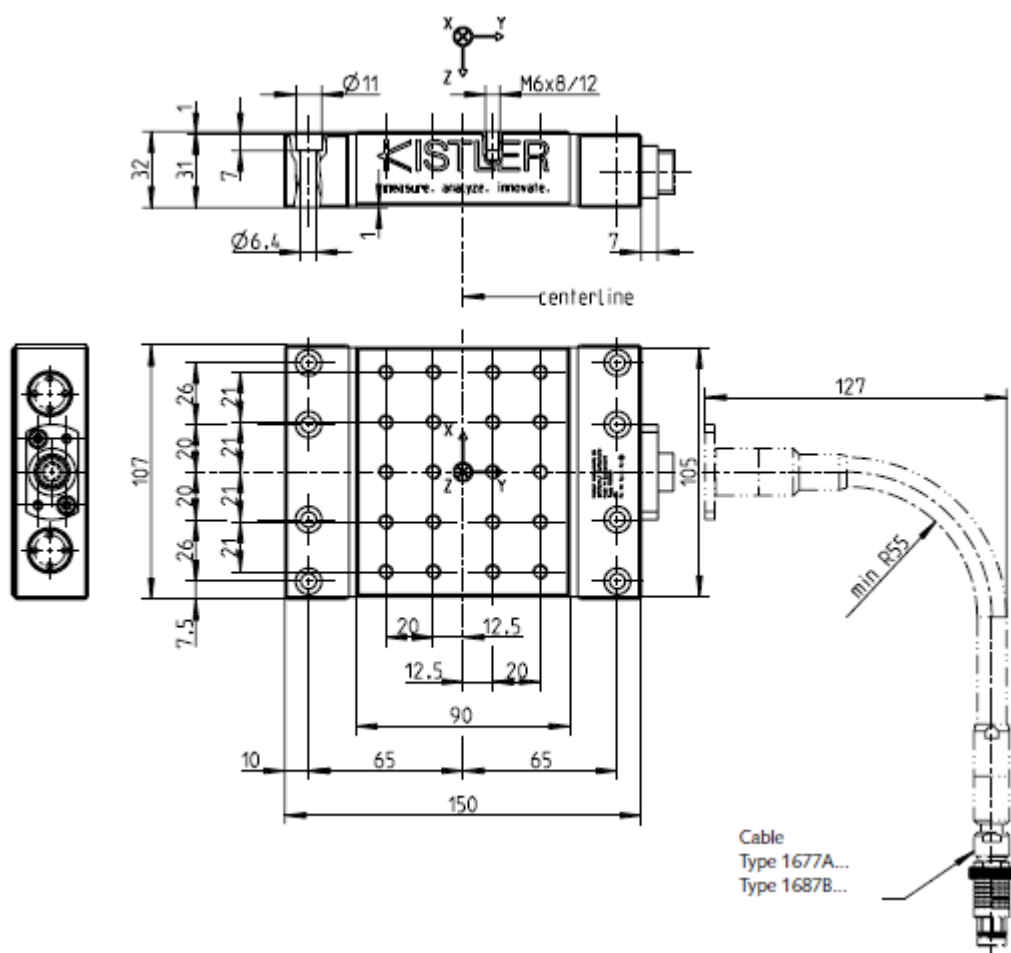
Piezoelektrický jev je hojně využíván v běžném moderním životě. Využití si našel např. v lékařských sonografech, generujících ultrazvuk, dále v oblasti digitálního tisku, bezpečnostní techniky (pohybová čidla, senzory...), elektrotechniky (mikrofony...), strojírenství (snímače, snímače silového zatížení...) apod.

Posledním vývojovým trendem jsou piezoelektrické motory a různé typy aktuátorů. Aktuátor je zařízení, zajišťující motoricky řízený lineární pohyb. Uplatnění nachází především v robotice, lékařství nebo v automatizaci. [17]

4. Dynamometr KISTLER 9129AA

Výrobce dynamometru, který byl použit při experimentu, je firma Kistler, jež je světovou jedničkou oblasti dynamické měřicí techniky. Kromě produktů pro specifické aplikace nabízí Kistler snímače pro měření obecných aplikací pro výzkum a vývoj nebo pro použití v testovacích laboratořích. Firma nabízí produkty pro měření tlaku, síly, kroutícího momentu, zrychlení a zesílení signálu. Neustálý vývoj technologií založeným nejen na měření sil posouvá hranice fyzikálních zákonů. Produkty firmy se uplatňují při vývoji motorů, monitorování vozidel, zpracování plastů a obrábění kovů, stejně jako u montážní a testovací techniky. Kistler zajišťuje vývoj i prodej senzorů, elektroniky a software, opírající se o celou škálu služeb.

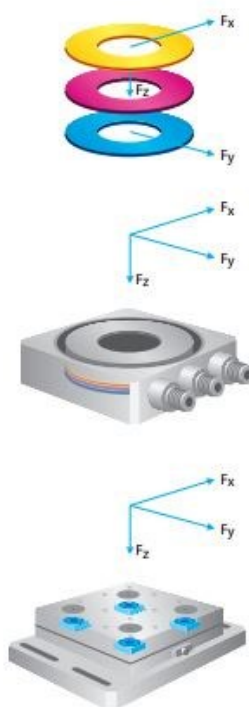
Označení použitého dynamometru je Kistler 9129AA. Jedná se o univerzální dynamometr s vysokou přirozenou frekvencí, o rozměrech 150 x 107 mm. Schéma dynamometru s rozměry je k vidění na obr. 12.



Obr. 12 – Rozměry dynamometru [27]

Nastavení dynamometru umožňuje přesné měření vysoce dynamických sil se širokým rozsahem měření až do 10 kN a zaručuje minimální vliv tepelných efektů. Dynamometr lze přišroubovat pouze na rovné, čisté povrchy, včetně magnetických desek. Montáž na nerovné montážní plochy může způsobit vnitřní deformaci a tím nepřesný výsledek měření. Slepé otvory M6 jsou k dispozici pro montáž součástí nebo pro držáky nástrojů. Použitý dynamometr lze použít pro měření složek řezné síly a momentů při frézovací, soustružnických, ale i vrtacích a jiných operacích.

Uvnitř dynamometru se ukrývají čtyři 3-komponentní senzory síly, které jsou namontovány pod vysokým předpětím mezi krytem a dvěma bočními základovými deskami. Každý senzor síly obsahuje tři křišťálové kotouče, z nichž jeden je citlivý na tlak a další dva jsou citlivé na smykovou sílu ve směru osy X a Z. Umístění senzorů je v tělese dynamometru viditelné na obr. 10. Výstupy čtyř senzorů jsou propojeny tak, že jsou schopny měřit jak složky řezné síly, tak i velikost točivého momentu síly (F_x , F_y , F_z , M_x , M_y , M_z). Hodnoty momentu jsou softwarově vypočteny ze složek síly. Díky speciálnímu upevnění senzorů, které jsou dostatečně tepelně izolovány, se dynamometr stává do značné míry necitlivý na teplotní vlivy. Výstupy čtyř integrovaných snímačů sil jsou předávány do 9-cestné zásuvky, jenž je spojena s nábojovým zesilovačem. Dynamometr je odolný vůči korozi i pronikání chladicí kapaliny, která může být při obráběcím procesu použita. Základní rozměry dynamometru jsou zobrazeny na schématu níže (obr. 13), technické parametry jsou vystiženy v tab. č. 1.



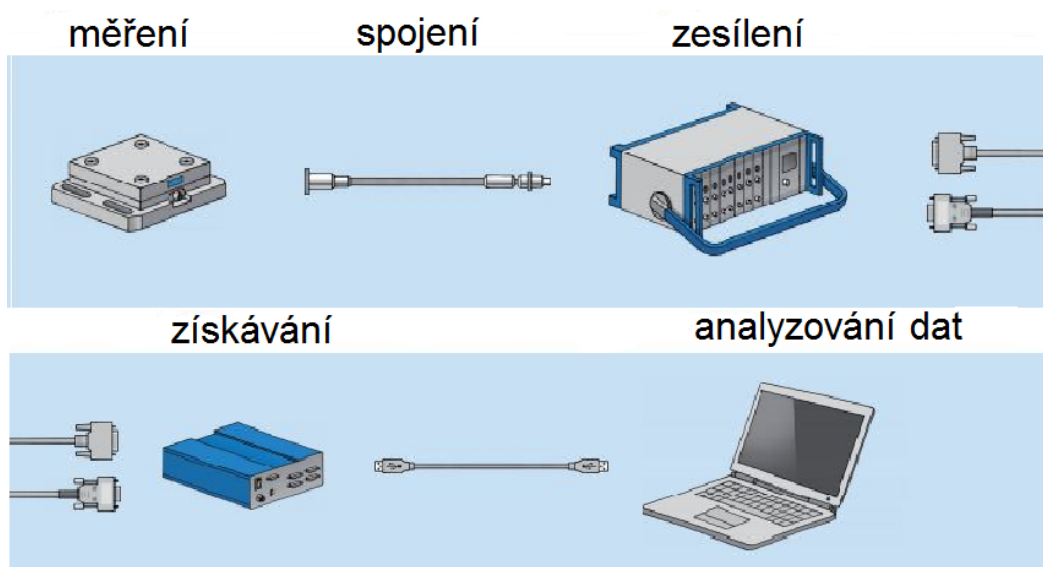
Obr. 13 – Umístění 4 tří-komponentních senzorů v tělese dynamometru [15]

Tab. 1 – Technické parametry [27]

Maximální povolený rozsah měření	F_x, F_y, F_z M_x, M_y, M_z	kN N·m	-10...10 -500...500
Kalibrovaný měřicí rozsah 100%	F_x, F_y, F_z	kN	0...10
Kalibrovaný dílčí rozsah měření 10%	F_x, F_y, F_z	kN	0...1
Kalibrovaný dílčí rozsah měření 1%	F_x, F_y, F_z	kN	0...0,1
Přetížení	F_x, F_y, F_z	%	20
Přesnost	-	N	<0,01
Citlivost hodnocení	F_x	pc/N	$\approx -8,1$
	F_y	pc/N	$\approx -4,1$
	F_z	pc/N	$\approx -8,1$
Linearita všech rozsahů	F_x, F_y, F_z	$\pm\%/FSO$	$\leq \pm 0,3$
Hystereze všech rozsahů	F_x, F_y, F_z	$\%/FSO$	$\leq 0,3$
Křížování	$F_z \rightarrow F_x, F_y$	%	$\leq \pm 2$
	$F_x \leftrightarrow F_y$	%	$\leq \pm 2$
	$F_x, F_y \rightarrow F_z$	%	$\leq \pm 2$
Tuhost	C_x, C_z	N/ μ m	≈ 1000
	C_y	N/ μ m	≈ 4000
Přirozená frekvence (Typ 9129A na pevném podkladu)	fn(x)	kHz	$\approx 3,5$
	fn(y)	kHz	$\approx 4,5$
	fn(z)	kHz	$\approx 3,5$
Rozsah provozních teplot	-	oC	0...70
Kapacita	F_x, F_y, F_z	pF	≈ 180
Stupeň ochrany EN60529	-	-	IP67
Hmotnost - dynamometr	-	kg	3,2
Hmotnost - krycí deska	-	kg	2,0
Montážní plocha	-	mm	90 x 105
Spojení	-	-	Fischerova příruba 9 pin

4.1. Měřicí aparatura

Hlavní komponentou měřicího řetězce je samotný dynamometr. Při jeho výrobě byl kladen důraz na kvalitu, odolnost a spolehlivost celého systému. Centrem pozornosti při konstruování byla spolehlivost systému. Zvláštní pozornost byla věnována izolaci tělesa dynamometru, vůči chladicí kapalině, popřípadě jiným druhům znečištění. Dynamometr i kabely jsou vybaveny zemnicí izolací, čímž je zaručen bezporuchový provoz. Další komponentou je spojovací kabel. Ten zajišťuje spolehlivé propojení mezi dynamometrem a zesilovačem. Kabel je chráněn kovovým úpletem, díky kterému je dostatečně chráněn vůči hrubým podmínkám, které panují při obráběním procesu. Oba konce kabelu jsou opatřeny stabilními konektory s třídou ochrany IP67. Tento kabel je univerzální pro všechny dynamometry firmy Kistler. Dalším pomyslným článkem měřicího řetězce je již zmíněný nábojový zesilovač typu 5070A, který byl speciálně vyvinut pro multikomponentní měření síly. Při působení síly na dynamometr je generován v jednotlivých kanálech signál, jenž je přímo úměrná působení síly. Měřený signál je v tomto zařízení zesílen, zpracován a dále převeden na elektrické napětí, které je následně transponováno přes AD převodník na signál pro následné vyhodnocení v PC. Poslední článkem v řetězci, je analyzující software DynoWare. V softwaru je možné si nastavit všechny parametry příslušného zesilovače, které jsou důležité pro získávání dat. Získané údaje jsou prezentovány jak v grafické podobě, tak i v textovém souboru. Software nabízí řadu funkcí pro zpracování a analýzu naměřených dat.



Obr. 14 – Měřicí řetězec [13]

4.2. Možnosti měření řezných sil

Dynamometr Kistler 9129AA, je konstruován pro měření složek řezné síly a momentů při všech obráběcích operacích. Při jednotlivých operacích se bude lišit jen upnutí dynamometru, při frézování, vrtání apod. se dynamometr upíná pomocí upínek a šroubů na stůl stroje, obrobek je přišroubován pomocí šroubů přímo k dynamometru. U soustružení se používá speciálních upínacích přípravků, s jejichž pomocí je dynamometr upnut do revolverové, či nožové hlavy soustruhu.

5. Návrh jednotlivých strategií

Samotnému experimentu, jehož základem bylo frézování průchozích drážek, předcházelo navržení strategií v CAM softwaru Mastercam 2017, který se používá pro programování CNC strojů.

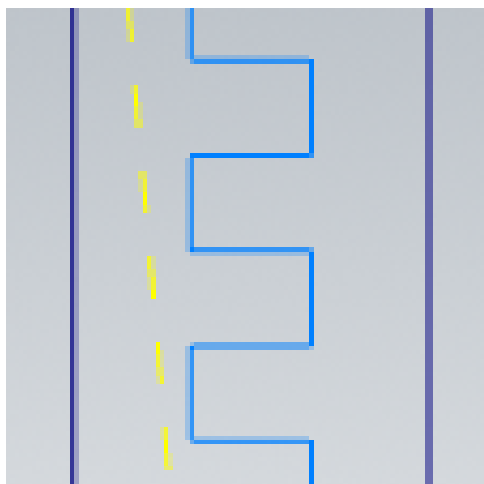
Myšlenkou bylo, aby drážky byly frézovány 3 různými strategiemi obrábění, 3 způsoby upnutí nástroje a každým upínačem měly být zhotoveny 2 drážky, které mezi sebou měly společné „žebro“, z důvodu lepšího porovnání dat ze silového záznamu. Celkový počet vyrobených drážek měl být tedy 18. Pro experiment byly k dispozici 2 kostky o rozměru 120x120x60 mm.

Po vytvoření kostky s drážkami v programu Autodesk Inventor 2016, bylo možné postoupit k návrhu strategií v softwaru Mastercam 2017. Po nekonečném vytváření různých strategií s mými kolegy (Bc. Tomáš Durďák, Bc. Petr Hamrozi) a konzultacích s vedoucím práce, byly nakonec vybrány pouze 2 strategie, které byly programovány pomocí Mastercamu. Všechny ostatní strategie, vytvořené pomocí tohoto programu byly buďto nevhodné nebo obdobné jako první nebo druhá odsouhlasená strategie.

Poslední (třetí) strategie byla následně vytvořena v programu SolidCAM - iMachining. Autorem této strategie je náš kolega Radim Janeczko. IMachining nabízí oproti MasterCamu mnoho různých nastavení. Podle SolidCAMU je iMachining průlom v technologii CNC frézování, který umožňuje obrábět rychleji a hlouběji a to pomocí optimalizace posuvu a opásání nástroje na celé dráze nástroje. Třetí strategie byla zvolena v návaznosti na předcházející 2 strategie a to tak, aby se od nich odlišovala a zároveň byla účinná. Program automaticky poskytuje optimální řezné podmínky pro různé materiály a CNC stroje a zajišťuje úspěšné obrábění hned napoprvé. Pro zajištění objektivit byly zvoleny stejné řezné podmínky jako u předchozích dvou strategií.

5.1. Strategie č. 1 (hřeben)

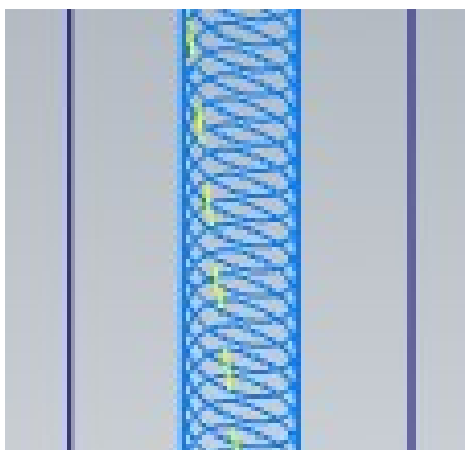
První zvolenou strategií vytvořenou v programu MasterCam byl tzv. hřeben. Název této strategie byl takto zvolen, jelikož dráha nástroje připomínala hřeben. Schéma lze vidět na obr. 15.



Obr. 15 – Detail dráhy hřebenového frézování drážky

5.2. Strategie č. 2 (lupínky)

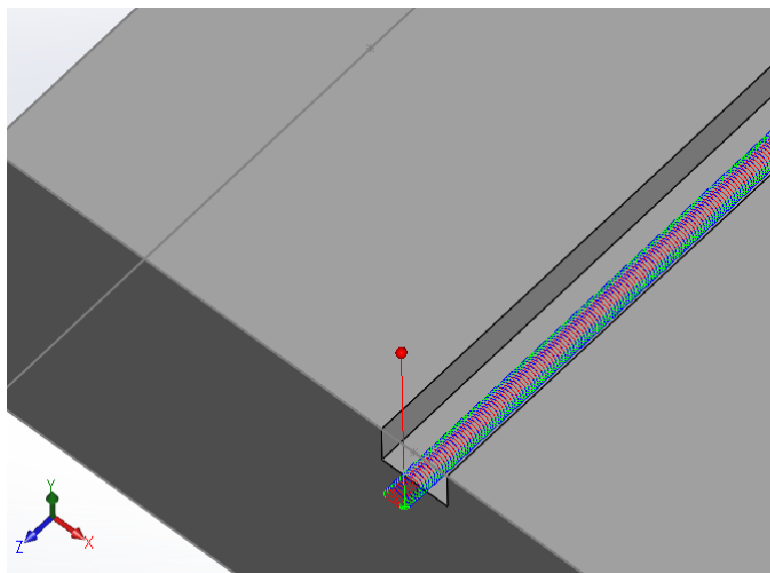
Další strategií bylo tzv. lupínkové frézování. Dynamická strategie, která byla rovněž vytvořena v programu MasterCam. Schéma lze vidět na obr. 16.



Obr. 16 – Detail dráhy lupínkového frézování drážky

5.3. Strategie č. 3 (iMachining)

Poslední vytvořenou strategií je strategie vytvořená v SolidCAMU pomocí technologie iMachining. Tato strategie se dráhou nástroje podobala lupínkové strategii.



Obr. 17 – Dráha frézování drážky pomocí iMachining

6. Experimentální část

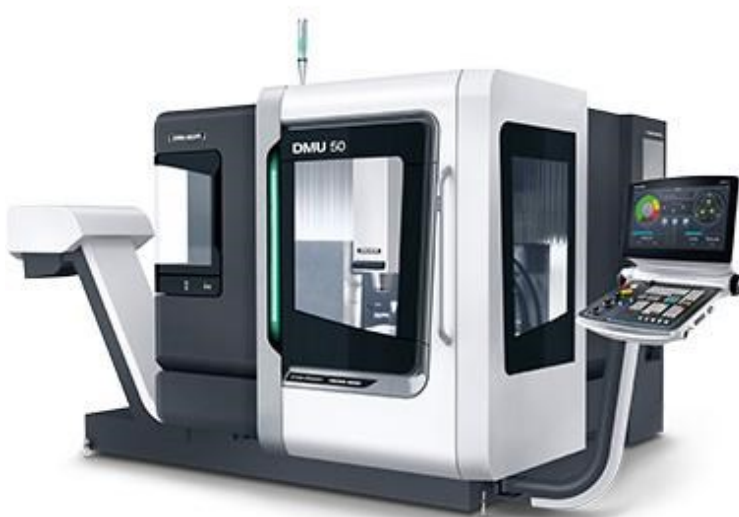
Experiment byl uskutečněn v dílně Katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie na Fakultě strojní v Ostravě. Přítomni byli i dva mí kolegové Bc. Tomáš Durdák a Bc. Petr Hamrozi, kteří si při stejném experimentu zpracovávali podklady pro vypracování svých diplomových prací.

Z teorie měření řezné síly je známo, že i za konstantních podmínek obrábění okamžitá velikost řezné síly F_{ok} kolísá $\pm 20\%$. Toto kolísání je způsobeno nehomogenitou materiálu, mechanikou tvorby třísky a svou roli zde hrají i další faktory. Z tohoto důvodu, by se experimentální měření složek sil mělo vždy několikrát opakovat, aby se zajistila věrohodnost naměřených hodnot. Tato skutečnost byla částečně zajištěna tím, že určitou strategií a upínačem byly zhotoveny vždy 2 drážky, z nichž byl vždy vypočten průměr složek síly řezání pro danou strategii a upínač.

6.1. Použité stroje a zařízení

6.1.1. Stroj

Experiment byl vykonán na pětiosém obráběcím centru DMG MORI DMU 50 2. generace (obr. 18), jehož základní parametry jsou k vidění v tab. č. 2. Na stůl obráběcího centra byl upnut dynamometr zn. Kistler.



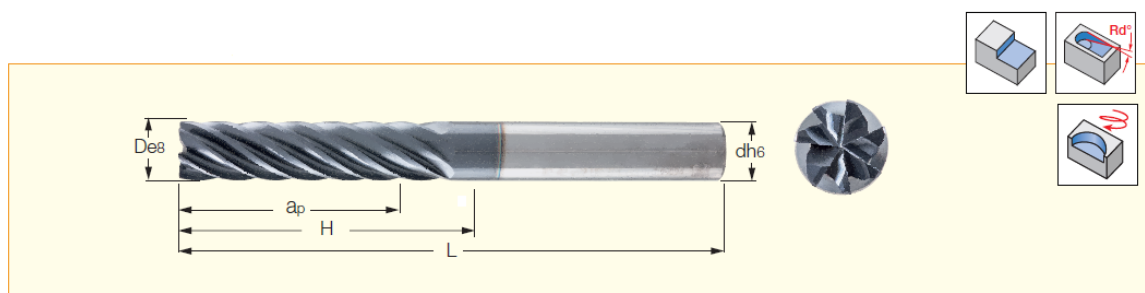
Obr. 18 – Použitý stroj [28]

Tab. 2 – Základní parametry DMG MORI DMU 50 2. generace

Parametr	Hodnota
Rozjezdy X · Y · Z	500 · 450 · 400 mm
Rychloposuv	30 000 m·min ⁻¹
Počet nástrojů v zásobníku	30
Upínací plocha stolu	700 x 500 mm
Maximální výkon	21 kW
Hmotnost stroje	4 480 kg
Řídicí systém	Heidenhain iTNC 530

6.1.2. Nástroj

Jako obráběcí nástroj byly použity 3 monolitní, stopkové frézy firmy ISCAR s označením ECL-H7-CF (obr. 19), její parametry lze najít v tab. 3, 4. Stopkové frézy se zuby ve šroubovici jsou jedním z nejpoužívanějších nástrojů při frézování. Fréza o průměru $D = 6\text{ mm}$ je vhodná pro vysokorychlostní, trochoidní ale i pro dokončovací frézovací operace. Maximální přípustná radiální hloubka řezu $a_e = 2,5 \cdot D$, která by měla zajistit velmi stabilní provoz bez vibrací. Maximální udávaná axiální hloubka řezu $a_p = 4 \cdot D$. Patentovaný design zubů a velké žlábkové zajišťují efektivní odvod třísek. Samotná fréza je vyrobena z materiálu IC902, což je ultra jemný karbid, obráběcí hrany jsou povlakovány TiAlN, který je nanášen metodou PVD. Tento typ je vhodný pro obrábění většiny materiálů, včetně kalených ocelí... Podle výrobce by fréza měla zajistit vysokou produktivitu u většiny materiálů, kvalitní výsledný povrch i při velkých a_p , vysokou přesnost vyrobené součásti a nízké řezné síly v průběhu obrábění o čemž se přesvědčíme v experimentální úloze.



Obr. 19 – Parametry použité frézy [29]

Tab. 3 – Základní parametry použité frézy

Označení frézy	D	d	a_p	L	Počet břitů	H_a°	IC902
ECL-H7 06- 24C06CF-70	6.00	6.00	24.00	7.00	7	37.0	•

Tab. 4 – Doporučené posuvy

Označení frézy	Dokončení		Vysokorychlostní obrábění	
	f_z (min)	f_z (max)	f_z (min)	f_z (max)
ECL-H7 06- 24C06CF-70	6.00	6.00	24.00	7.00

6.1.3. Upnutí

Dokonalé upnutí nástrojů je důležité pro optimální využívání všech řezných podmínek daného obráběcího stroje. Má velký vliv také na konečnou přesnost i kvalitu obráběného povrchu, opotřebení nástroje a celkovou délku výrobního času. Pro efektivní výrobu je také velice důležitá rychlost provedení výměny nástroje a životnost upínacího prostředku. [30]

a) Upínač č.1 (kleštinový upínač)

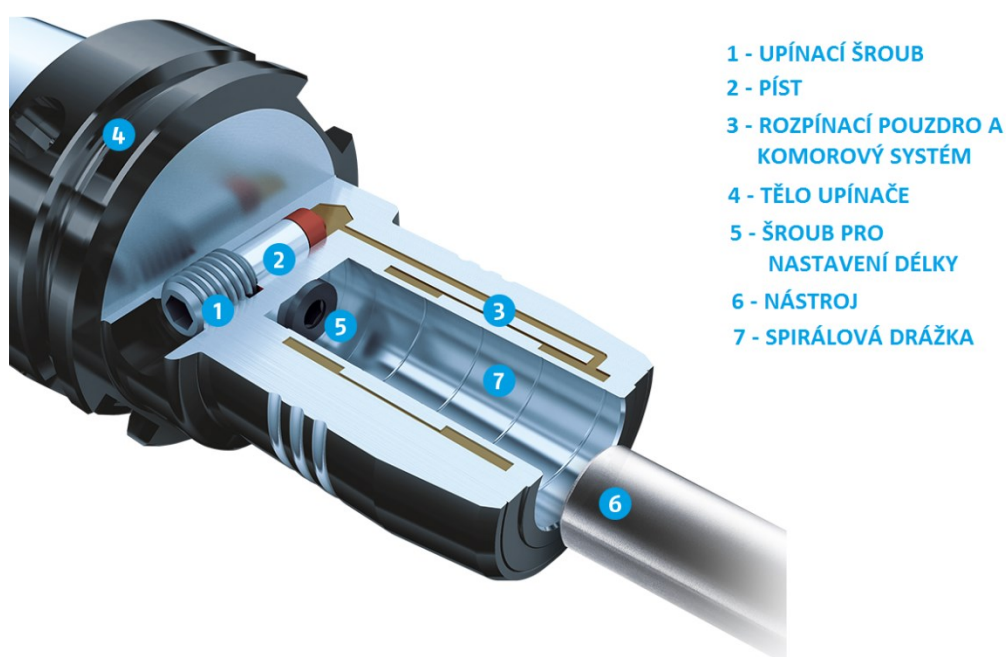
Kleštinové upínače jsou velmi výrobě rozšířené. Výhodou je, že při přechodu na jiný průměr stopky stačí vyměnit kleštinu a není třeba užít jiný upínač. Nevýhodou je nižší přesnost výroby oproti hydraulickým a tepelným upínačům.



Obr. 20 – Použitý kleštinový upínač

b) Upínač č.2 (hydraulický upínač Schunk TENDO)

Princip upnutí spočívá v tom, že při utahování upínacího šroubu se pohybuje píst s těsnícím prvkem a zvyšuje tím tlak kapaliny v komorovém systému, čímž dochází k deformaci rozpínacího pouzdra a upnutí vložené stopky nástroje. Spirálová drážka stírá nečistoty na stopce a vytváří pro ně prostor, čímž se zvyšuje přesnost a upnutí a přenos kroutícího momentu. [31]



Obr. 21 – Řez hydraulickým upínačem [32]

c) Upínač č.3 (tepelný upínač Mapal)

Moderní tepelné upínače zaručují vysokou přesnost obvodového házení, jednoduché a rychlé upínání a štíhlé kontury. Tyto výhody nabízel i použitý tepelný upínač firmy Mapal, viz. obr. 22. Princip spočívá v teplotní roztažnosti materiálu, kdy vlivem ohřevu držáku dojde ke zvětšení upínacího otvoru, do kterého se následně vloží nástroj. Tepelné upínání je většinou ekonomičtější variantou než alternativní nástrojové držáky. Díky těmto vlastnostem přispívají tepelné upínače k vyšší přesnosti a kvalitě povrchu obrobků oproti alternativním nástrojovým upínačům. Výměna nástroje se v moderních přístrojích pro tepelné upínání uskuteční během 30 sekund.



Obr. 22 – Použitý tepelný upínač

6.1.4. Obrobek

Jako materiál polotovaru byla zvolena nelegovaná konstrukční ocel S355J2+N, dle ČSN 11 503. Koncovka +N znamená, že materiál byl normalizačně žhán nebo válcován. Mechanické vlastnosti a chemické složení popisují tabulky č. 5, 6.

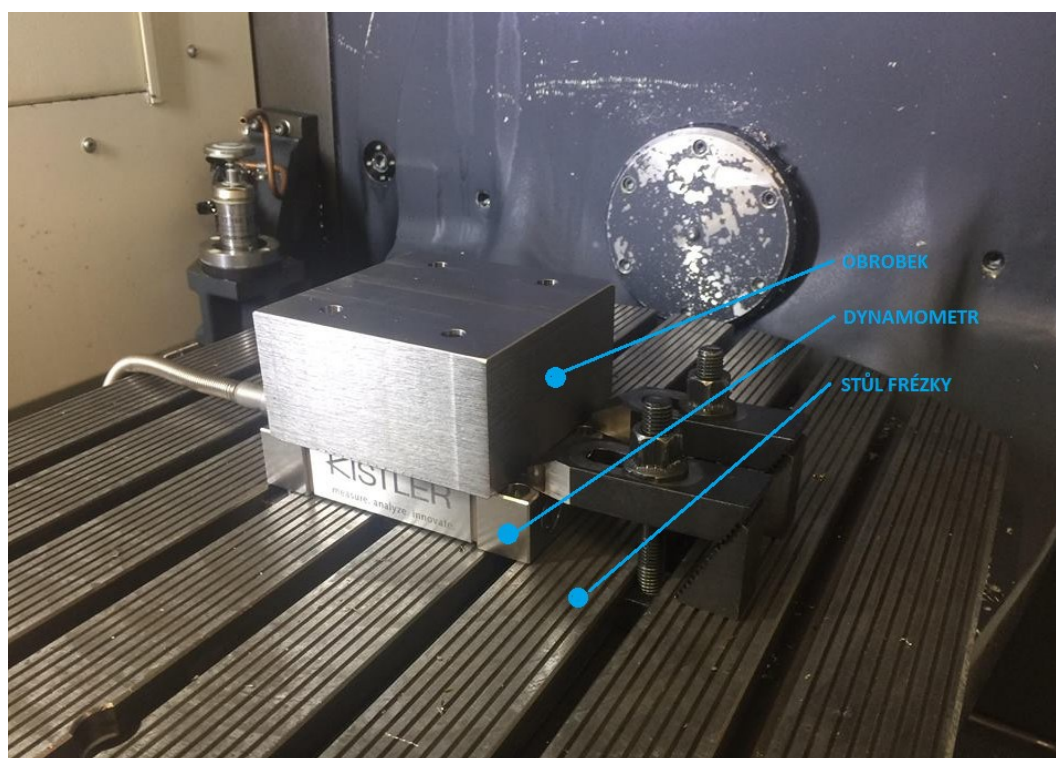
Tab. 5 – Mechanické vlastnosti použitého materiálu

Ocel S355J2+N	Značka	Hodnota	Jednotky
Mez kluzu	$R_{P0,2}$	Min. 355	MPa
Mez pevnosti	R_m	Min. 490	MPa
Tažnost	A_5	Min. 20	%
Nárazová práce	KV	Min. 27 (při -20 °C)	J

Tab. 6 – Chemické složení v %

Ocel S355J2-N	C	Mn	Si	P	S
Dle ČSN 41 2050	0,22	1,60	0,55	0,035	0,035

Polotovarem (obrobkem) byly 2 kostky, z nichž každá z nich měla jmenovitý rozměr 120x120x60mm. V kostkách byly již zhotoveny otvory pro uchycení na dynamometr. Výrobní výkres kostky s drážkami, viz příloha A. Na stůl frézky byl pomocí upínek připevněn dynamometr, na něj byl poté přišroubován polotovar, viz obr. 23. Stůl frézky byl vykloněn o úhel $\alpha=2,86^\circ$. Toto vyklonění zajistilo proměnlivou axiální hloubku řezu $a_p=6-12\text{mm}$ (1D-2D průměru nástroje). Takto nachystaná sestava byla připravena pro obrábění drážek.

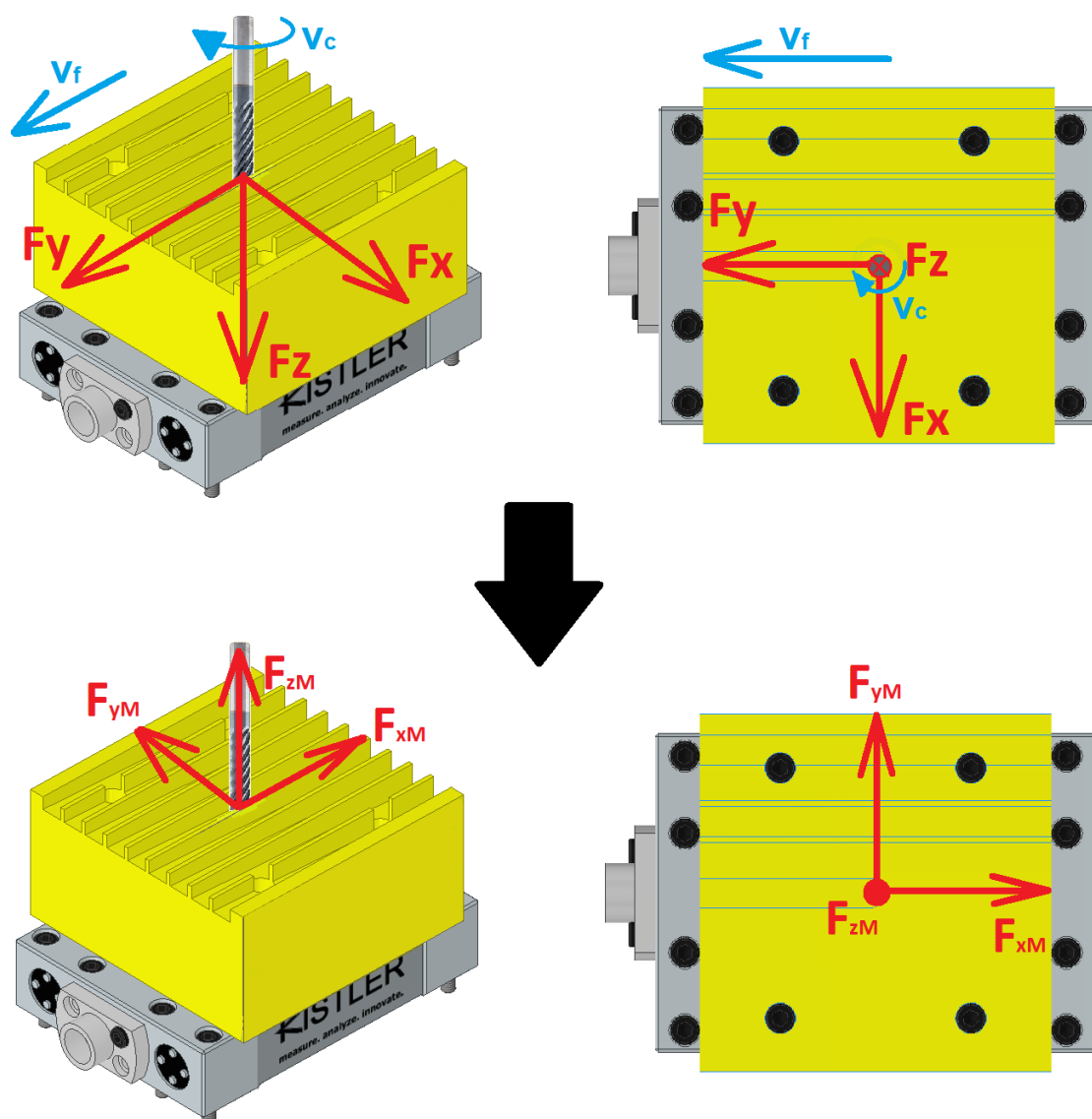


Obr. 23 – Příprava pro obrábění

6.1.5. Dynamometr Kistler 9129A

Síla řezání se v průběhu záběru bříty natáčí a její průmět do stabilní soustavy snímaných sil na dynamometru, mění velikost naměřených hodnot ve složkách F_x , F_y , F_z (složky zaznamenávané dynamometrem). Pro přepočet skutečných složek F_c , F_{cN} , F_f , F_p je nutný přepočet dle okamžitého úhlu natočení frézy a tedy záběru zubu. [14] Jedná se o složitý přepočet, kterým se tato práce nezabývá. Přepočet skutečných složek síly řezání by mohl být námětem pro disertační práci.

Směr jednotlivých os dynamometru byl transformován do souřadného systému stroje následujícím způsobem, viz obr. 24. Použitý souřadný systém je v souladu s ČSN ISO 3002. Další potřebné informace týkající se dynamometru, viz kapitola 4. – Dynamometr Kistler 9129A.

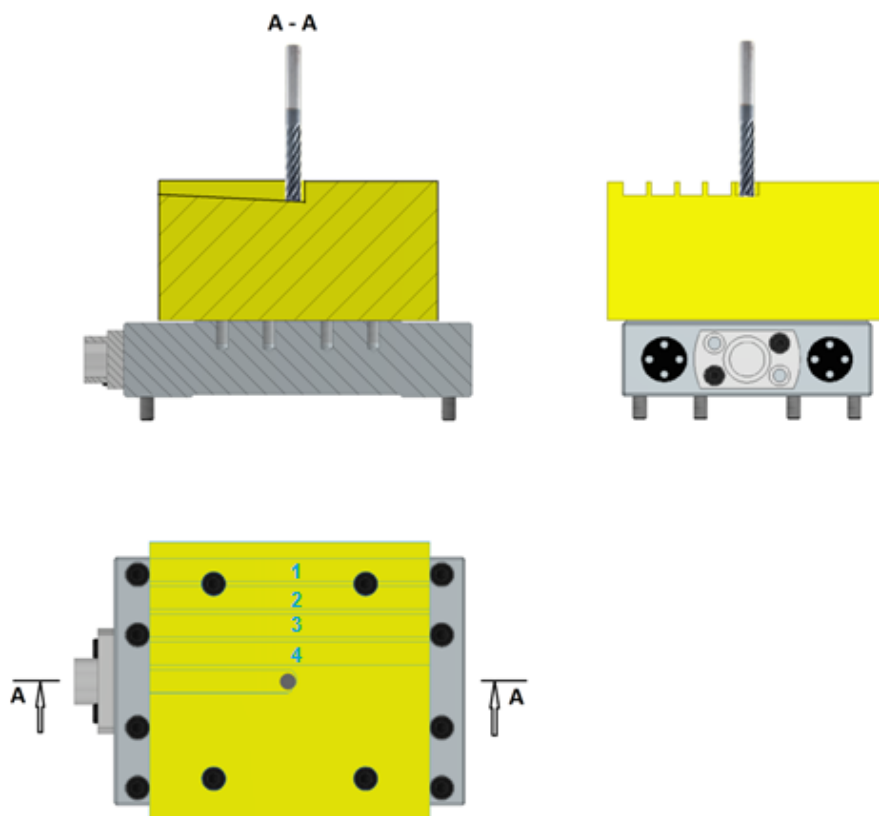


Obr. 24 – Transformace souřadného systému (souřadný systém dynamometru-nahoře, transformovaný souřadný systém stroje-dole)

- F_{xM} - složka síly řezání působící ve směru rychlosti posuvu (aktivní složka)
- F_{yM} - složka síly řezání působící kolmo na směr posuvu (aktivní složka)
- F_{zM} - složka síly řezání působící ve směru osy vřetene (pasivní složka)

6.2. Průběh experimentu

Experimentem bylo tedy frézování 18 frézování průchozích drážek 3 různými strategiemi obrábění, 3 způsoby upnutí nástroje, kdy každým upínačem měly být zhotoveny 2 drážky (viz kapitola 5.1). Schématický postup frézování je znázorněn na obr. 25. Kvůli nestabilitě procesu obrábění při první strategii se nakonec počet vyrobených drážek snížil na 14. Každá drážka byla nejdříve vyhrubována a poté byl proveden dokončovací řez. Obrábění probíhalo za konstantního posuvu i otáček, hloubka řezu byla proměnlivá, čehož se docílilo náklonem stolu frézky o úhel $\alpha = 2,86^\circ$. Nástroj najížděl do materiálu v axiální hloubce řezu $a_p = 6$ mm a vyjížděl v $a_p = 12$ mm. Řezné podmínky jsou k vidění v tab. 7 pro hrubování, v tab. 8 pro dokončení. Při dokončení drážek byla použita jednotná strategie, kdy jedna strana drážky byla frézována sousledně a druhá strana nesousledným způsobem. Dno drážky se při dokončování neobrábělo. Velikost složek síly řezání se při dokončování výrazně neměnila, a proto se při závěrečném zhodnocení tato práce věnuje pouze hrubovacím operacím.



Obr. 25 – Schéma frézování drážek

Tab. 7 – Řezné podmínky pro hrubování drážek

Řezné podmínky	Značka	Hodnota	Jednotky
Řezná rychlost	v_c	250	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$
Posuv na zub	f_z	0,08	mm
Axiální hloubka řezu	a_p	6-12	mm
Otáčky vřetene	n	13 262	$\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$
Druh frézování	Sousledné		

Tab. 8 – Řezné podmínky při dokončování drážek

Řezné podmínky	Značka	Hodnota	Jednotky
Řezná rychlost	v_c	250	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$
Posuv na zub	f_z	0,03	mm
Axiální hloubka řezu	a_p	6-12	mm
Druh frézování	Sousledné/nesousledné		

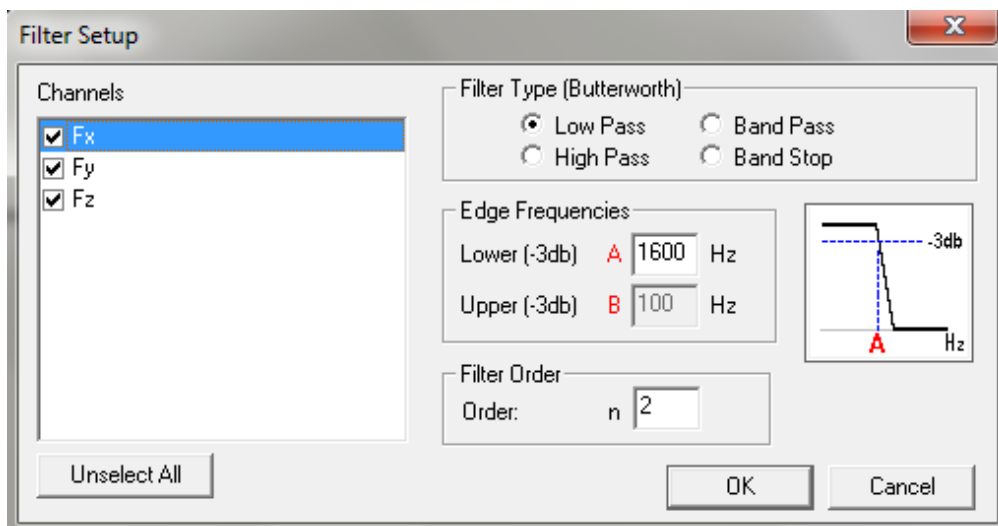
6.3. Analýza silového zatížení

Před každým frézováním drážky byla zapnuta měřící aparatura Kistler. Po vyfrézování drážky bylo měření zastaveno a celý proces se opakoval frézováním další drážky. Pomocí softwaru Dynoware byly poté analyzovány jednotlivé složky síly řezání. Pomocí funkce Mean value, byla ze záznamu odstraněna data nájezdu nástroje do materiálu a také výjezdu z něj. Tyto hodnoty nám neposkytují žádné využitelné informace o silovém zatížení, které vznikají v průběhu odebírání materiálu.

Jelikož byla při měření použita vysoká vzorkovací frekvence, obsahuje záznam velké množství dat, z nichž některá z nich jsou nic nevypovídající. Tyto data je nutné odstranit filtrací pomocí funkce Low Pass, viz obr. 26. Po filtraci software zobrazí hodnoty před zadanou hodnotou, tzn. 1600 Hz. Tato hodnota byla vypočtena s ohledem na to, aby nebyla odstraněna zubová frekvence frézy podle vztahu (7). Pro zpracování dat byl použit program Microsoft Excel.

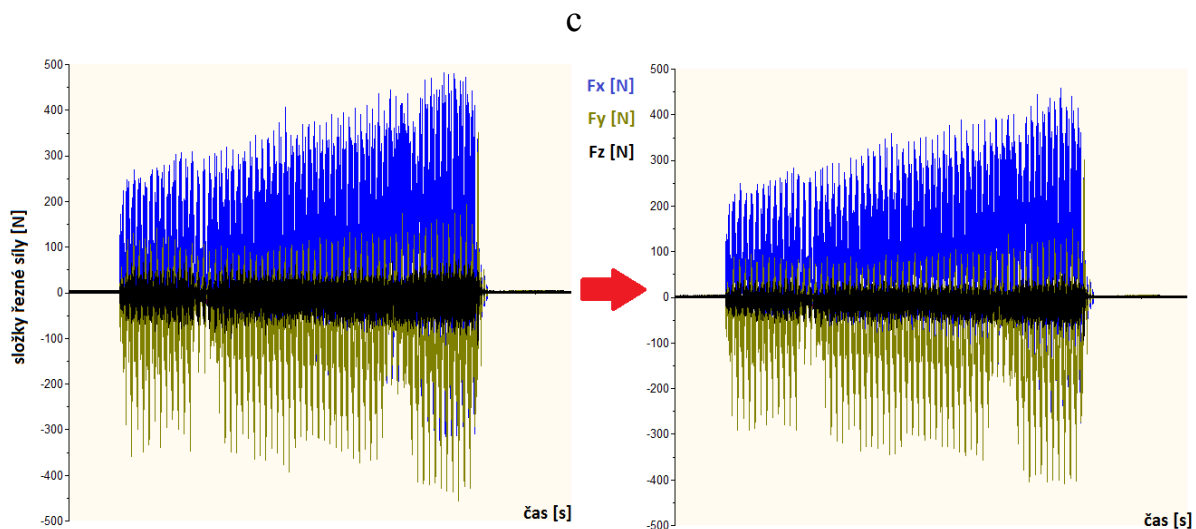
$$f = \frac{n}{60} \cdot z \quad [\text{Hz}] \quad (7)$$

$$f = \frac{13\,262}{60} \cdot 7 = 1\,547.2 \text{ Hz} \cong 1600 \text{ Hz}$$



Obr. 26 – Filtrace dat v softwaru Dynaware

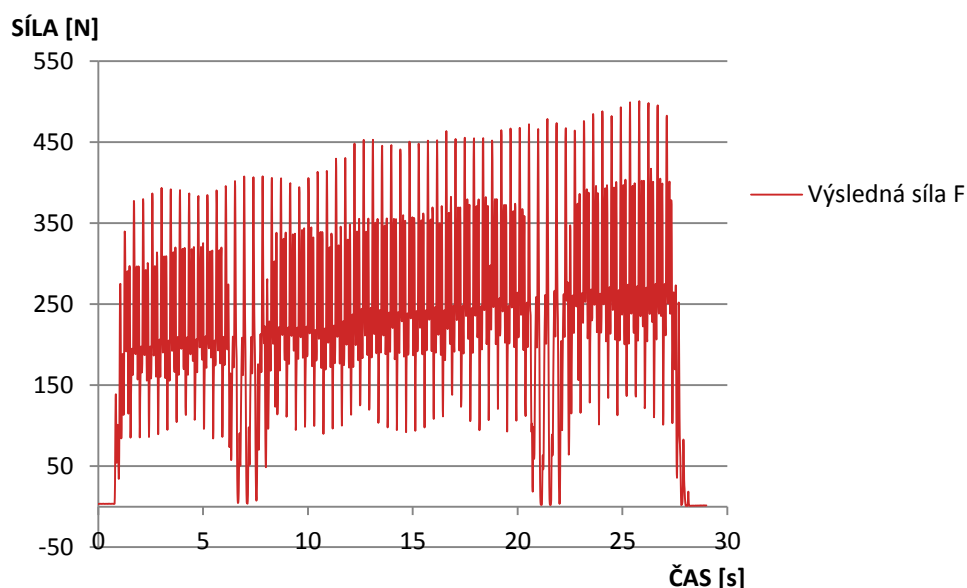
Na následujícím obrázku je zobrazen rozdíl před a po filtraci naměřených dat. Na obrázku je záznam měření v délce 40s. Na první pohled není změna nijak razantní, průměrné hodnoty jednotlivých složek se nijak nezmění, změní se však rozkmity, jejichž hodnota se po filtraci sníží.



Obr. 27 – graf naměřených hodnot před a po filtraci v závislosti na čase (upínač1, strategie1, drážka2)

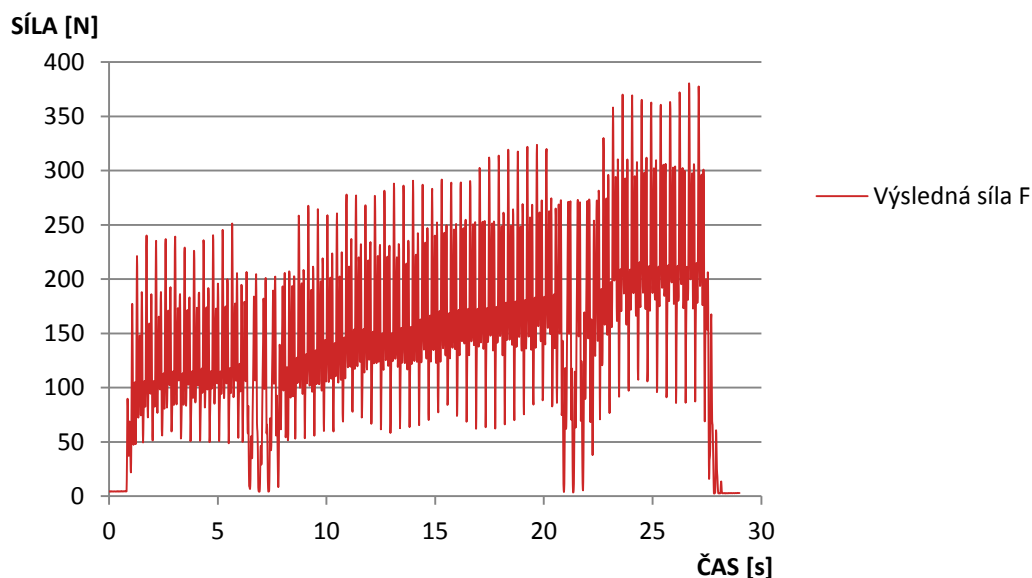
6.4. Obrábění strategií č. 1 (hřeben)

Touto strategií naprogramovanou v programu MasterCam 2017 se uskutečnila výroba pouze 2 drážek. Strategie vykazovala velké vibrace a hodnoty složek síly řezání. První drážka byla nedopatřením frézována v hloubce 12-18 mm (2D-3D nástroje), při obrábění druhé drážky byla již hloubka řezu nastavena na správnou hodnotu. Na obr. 28 je vidět průběh výsledné síly F_v , při frézování první drážky. Velikost výslednice byla vypočítána z jednotlivých velikostí složek síly řezání v daném okamžiku. Průměrná hodnota výslednice sil se na počátku obrábění ($a_p=12$ mm) pohybovala okolo 230 N, s přibývajícím hloubkou řezu tato hodnota vzrostla až na 300 N (tzn. nárůst síly cca 30%).



Obr. 28 – Výsledná síla F_v při frézování drážky č. 2 ($v_c=250$ m·min⁻¹, $f_z=0,08$ mm, $a_p=12-18$ mm)

Na obr. 29 je totožný graf, avšak už se správnou hloubkou řezu $a_p=6-12$ mm. Průměrná hodnota výslednice sil se na počátku obrábění ($a_p=6$ mm) pohybovala okolo 130 N, s přibývajícím axiální hloubkou řezu tato hodnota vzrostla až na průměrných 230 N (nárůst síly o 77%).

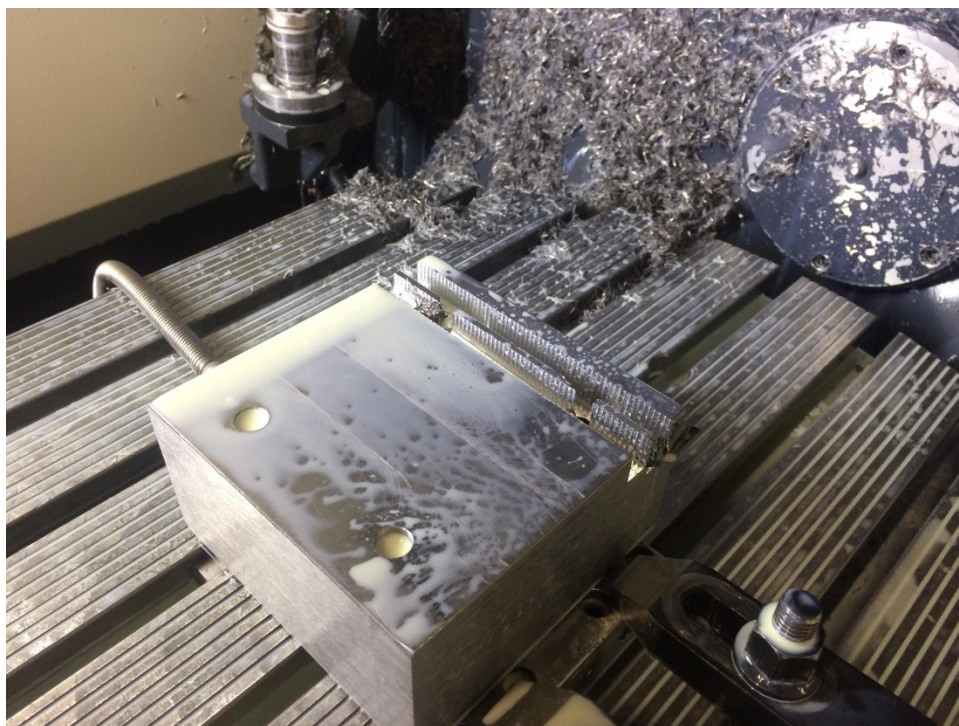


Obr. 29 – Výsledná síla F_v při frézování drážky č. 2 ($v_c=250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f_z=0,08 \text{ mm}$, $a_p=6\text{-}12 \text{ mm}$)

Z grafů lze vyvodit, že s přibývajícím hloubkou řezu, rostla téměř lineárně i velikost síly řezání. I přes skutečnost, že při správně nastavené axiální hloubce řezu byly složky síly řezání výrazně menší, než při první drážce, obráběcí proces doprovázely značné vibrace a proto byla tato strategie raději pozastavena. Nestabilita procesu byla způsobena především výrobním časem, který byl cca 4x kratší než u zbývajících dvou strategií (výrobní čas činil 27,6 s.). V tab. č. 9 jsou zobrazeny průměrné hodnoty jednotlivých složek síly řezání a z nich vypočítané výslednice. Pro zachování objektivity byl využit záznam z frézování druhé drážky, jelikož první drážka měla nesprávnou hloubku řezu a_p . Hodnoty v tabulce byly získány ze záznamu silového působení. Pomocí funkce Mean value, byla ze záznamu odstraněna data nájezdu a výjezdu nástroje z materiálu a následně proběhla i filtrace pomocí funkce Low pass. Stejný postup byl využit pro výpočet jednotlivých složek řezné síly i u ostatních strategií.

Tab. 9 – Průměrné hodnoty při frézování strategií č. 1 (hřeben)

Drážka	Upínač	t [s]	F_{xM} [N]	F_{yM} [N]	F_{zM} [N]	F_v [N]
2	1. (kleštinový)	27,6	74,1	-111,8	8,9	134,4



Obr. 30 – Ukázka polotovaru po obrábění drážek hřebenovou strategií

6.5. Obrábění strategií č. 2 (lupínky)

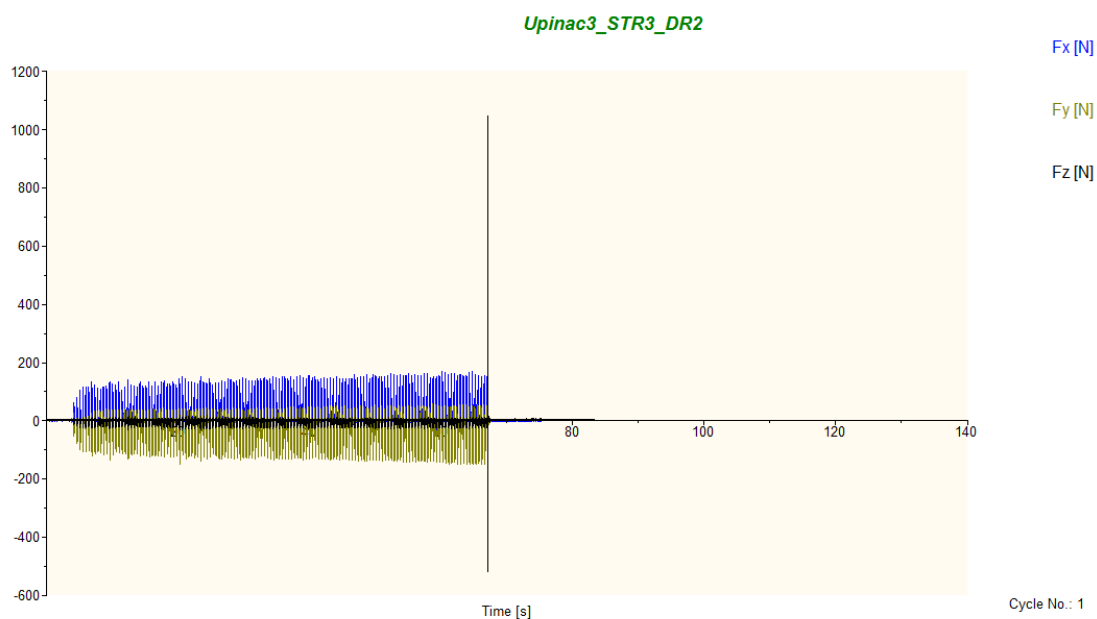
Další strategií, která byla rovněž vytvořena v programu MasterCam bylo tzv. lupínkové frézování. Výrobní čas strategie činil 118,9 s a průběh obrábění byl při všech 6 vyrobených drážkách klidný a plynulý. V tab. 10 jsou zobrazeny průměrné naměřené hodnoty jednotlivých složek sil řezání, včetně jejich výslednice.

Tab. 10 – Průměrné hodnoty při frézování strategií č. 2 (lupínky)

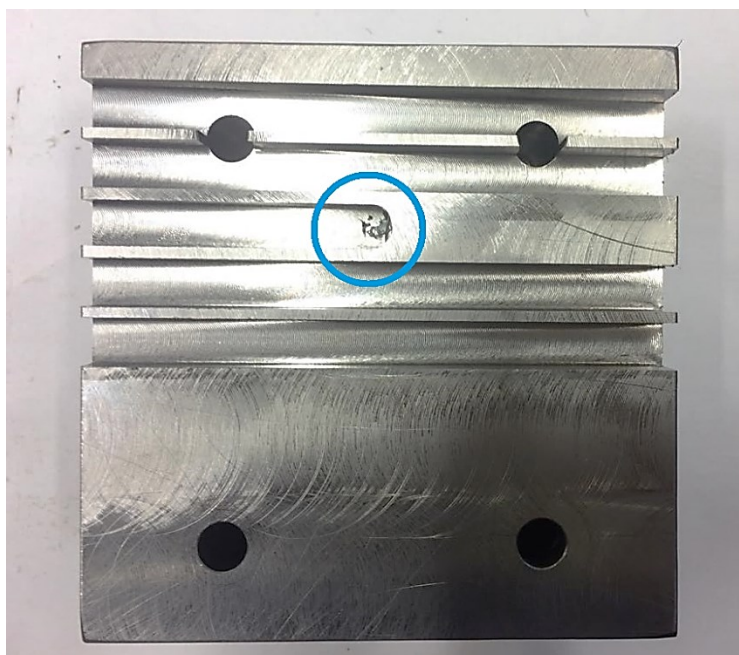
Drážka	Upínač	t [s]	F_{xM} [N]	F_{yM} [N]	F_{zM} [N]	F [N]
3, 4	1. (kleštinový)	118,9	28,2	-31,7	-0,2	42,5
5, 6	2. (hydraulický)	118,9	29,1	-35,7	-1,1	46,2
7, 8	3. (tepelný)	118,9	21,7	-35,5	1,8	41,7

6.6. Obrábění strategií č. 3 (iMachining)

Obrábění poslední strategií, jejíž výrobní čas činil 127,5 s, bylo opět velmi klidné. Při druhé drážce, která byla touto strategií obráběna (tepelné upnutí) došlo ke zlomení nástroje v čase 62,9 (cca polovina frézované drážky), viz obr 31, 32. Zlomení nástroje bylo způsobeno nejspíše opotřebením nástroje. Při zlomení nástroje výrazně vzrostla síla F_z , působící ve směru vřetene a jejichž hodnoty byly v průběhu obrábění nejnižší.



Obr. 31 – Zlomení nástroje (strategie-iMachining, upínač-tepelný, drážka-2)

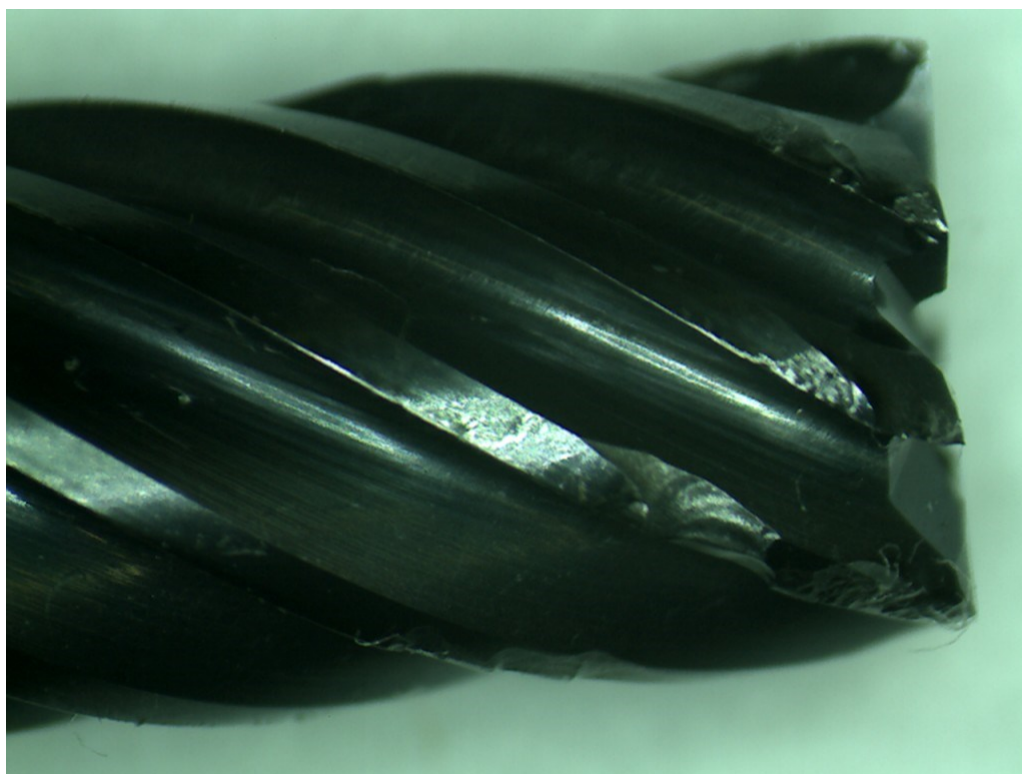


Obr. 32 – Kostka po vyfrézování drážek s vyznačením místa zlomení nástroje

Tab. 11 – Průměrné hodnoty při frézování strategií č. 3 (iMachining)

Drážka	Upínač	t [s]	F_{xM} [N]	F_{yM} [N]	F_{zM} [N]	F [N]
9, 10	1. (kleštinový)	127,5	42,4	-39,8	-2,3	58,1
11, 12	2. (hydraulický)	127,5	27,0	-30,5	-1,0	48,0
12, 13	3. (tepelný)	127,5	24,1	-29,9	1,3	38,2

Při experimentu nebylo bráno v úvahu opotřebení nástroje, stav nástroje byl během obrábění sice kontrolován pomocí mikroskopu. Nicméně nebylo měřeno opotřebení, na jehož základě by se stanovila hodnota trvanlivosti nástroje. Detail nástroje po obrobení drážek strategií iMachining. Na nástroji je znatelné značné opotřebení, viz obr. 33.



Obr. 33 – Detail nástroje

7. Zhodnocení experimentu

Nástroj je během obrábění vystaven velkému silovému působení, jestliže toto působení překročí určitou mez, nástroj se se poté odchýlí od své osy a výsledná plocha je geometricky nepřesná a méně kvalitní. Přesností obrobených drážek se zabývá diplomová práce kolegy Bc. Petra Hamroziho. Průhyb nástroje lze vypočítat analyticky jako deformaci vetknutého nosníku od obecné síly.

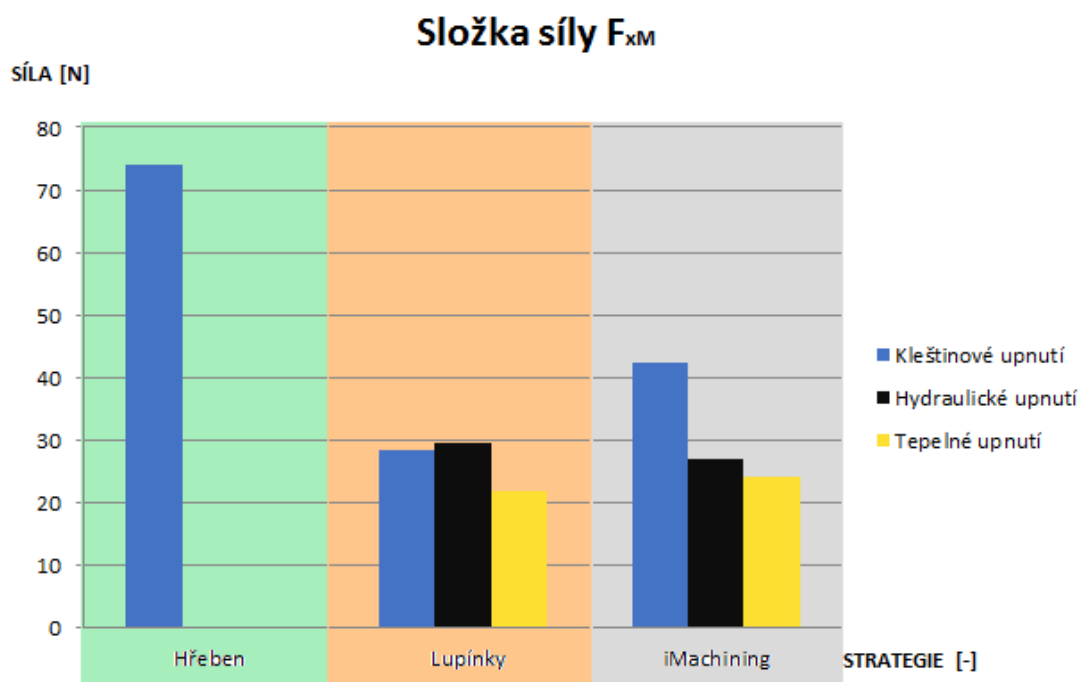
Cílem experimentu nebylo ani tak zjištění přesných hodnot řezných sil, ale spíše zaznamenat průběh složek síly řezání, zjistit průměrné a maximální hodnoty a následně vyvodit závěr.

Experimentální úlohu lze hodnotit podle dvou hledisek. Prvním hlediskem bylo hodnocení dle nejvýhodnější strategie, druhým hlediskem byl výběr nejvhodnějšího typu upnutí, co se velikosti složek síly řezání týče.

7.1. Složka síly řezání F_{xM}

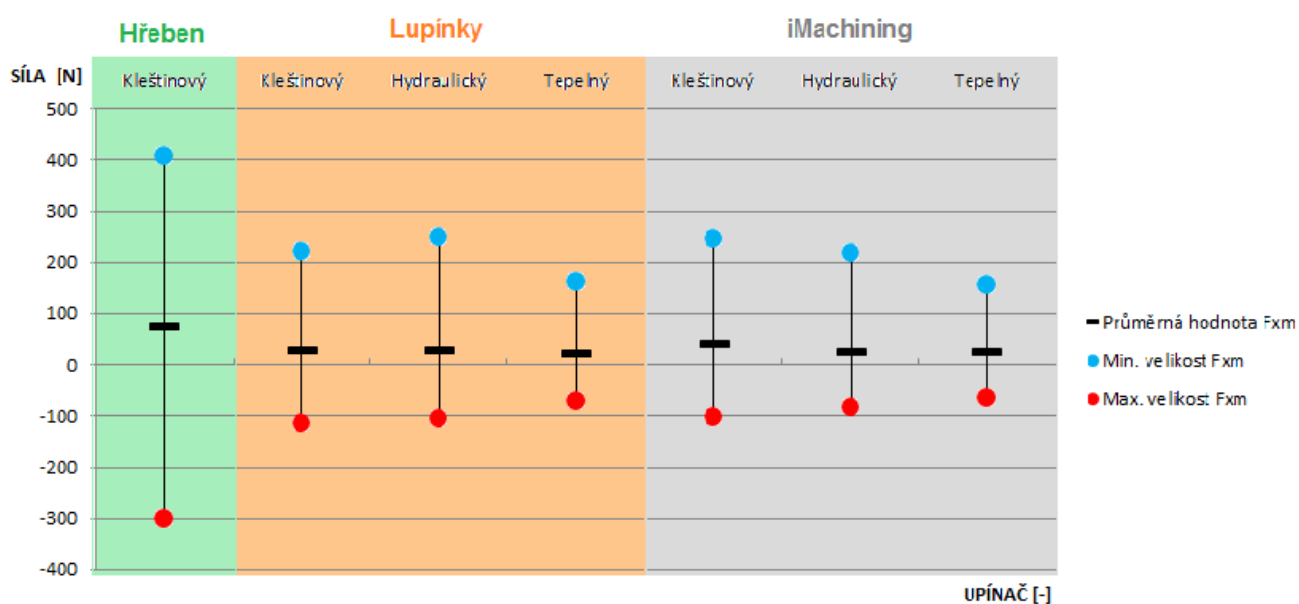
Složka síly řezání F_{xM} působila ve směru rychlosti posuvu. Jestliže pomineme hřebenovou strategii, která vykazuje největší hodnoty, co se týče velikosti složek síly řezání, tak největší průměrné hodnoty složky síly řezání F_{xM} (42,4 N) vykazovala strategie-iMachining, upínač-kleštinový. Pokles velikosti složky F_{xM} o 43 % oproti obrábění strategií-hřeben.

Nejmenších naměřených hodnot (21,7 N) bylo dosaženo u lupínkové strategie, upínač-tepelný. Pokles velikosti složky F_{xM} činil téměř 71 % oproti první strategii. Nejmenších průměrných hodnot složky síly řezání F_{xM} vykazovala lupínková strategie.



Obr. 34 – Průměrné hodnoty složky síly řezání F_{xM}

Na obr. 35 je zobrazen rozptyl složky síly řezání F_{xM} při obrábění jednotlivými strategiemi a upínacími. Dle grafu je patrné, že nejmenší hodnoty rozkmitu u složky F_{xM} je dosaženo u tepelného upnutí. Z grafu lze dále vyčíst, že velikosti rozptylu jsou přímo úměrné velikosti dané složky síly.



Obr. 35 – Rozkmit složky řezné síly F_{xM}

7.2. Složka řezné síly F_{yM}

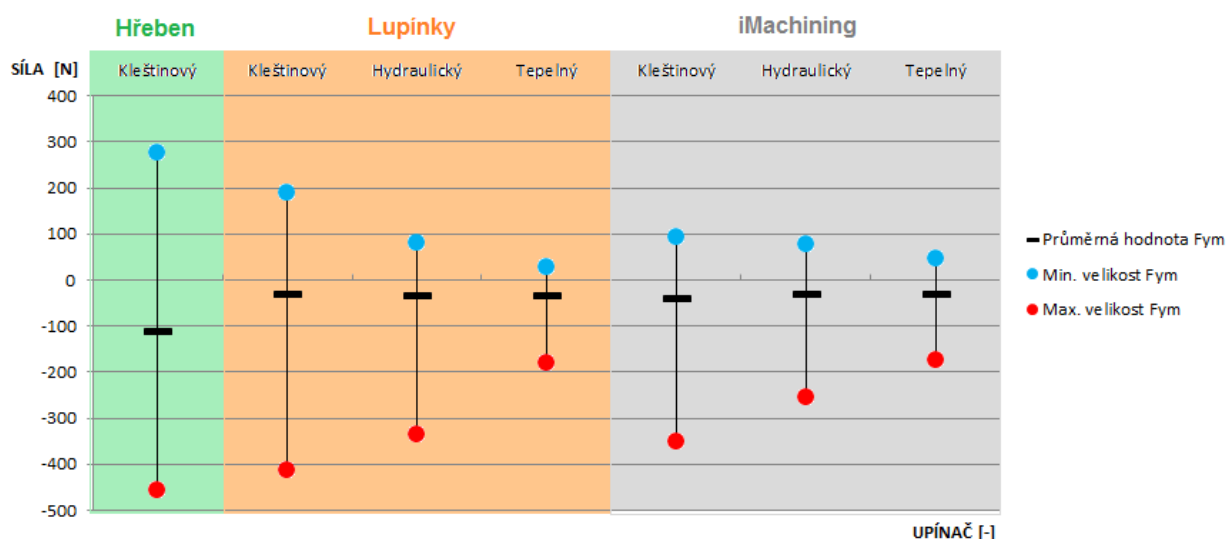
Složka řezné síly F_{yM} je normála k síle posuvu F_{xM} . Průměrná velikost této složky síly řezání se pohybuje v záporných hodnotách, což značí, že směr působení složky síly F_{yM} je opačný vůči transformovanému souřadnému systému stroje. Složka F_{yM} byla při obrábění nejvíce zatěžována, což je pravděpodobně zapříčiněno dynamickým rozjezdem jednotlivých strategií. Hřebenová strategie, opět vykazovala největší hodnoty síly řezání, druhá nejvyšší naměřená hodnota složky F_{xM} (-39,8 N) byla naměřena u strategie-iMachining, upínač-kleštinový. Což je hodnota o 64 % menší než u hřebenové strategie.

Nejnižší naměřenou hodnotu složky řezné síly F_{xM} (-29,9 N) vykazuje také strategie-iMachining, ovšem pomocí tepelného upnutí. O 73 % menší průměrná velikost složky síly řezání F_{xM} než u hřebenové strategie. Takto skutečnost značí, že upnutí má velký vliv na velikost složek řezné síly. Strategie-iMachining je strategií, jejíž průměrná velikost síly F_{xM} byla nejnižší.



Obr. 36 – Průměrné hodnoty složky řezné síly F_{yM}

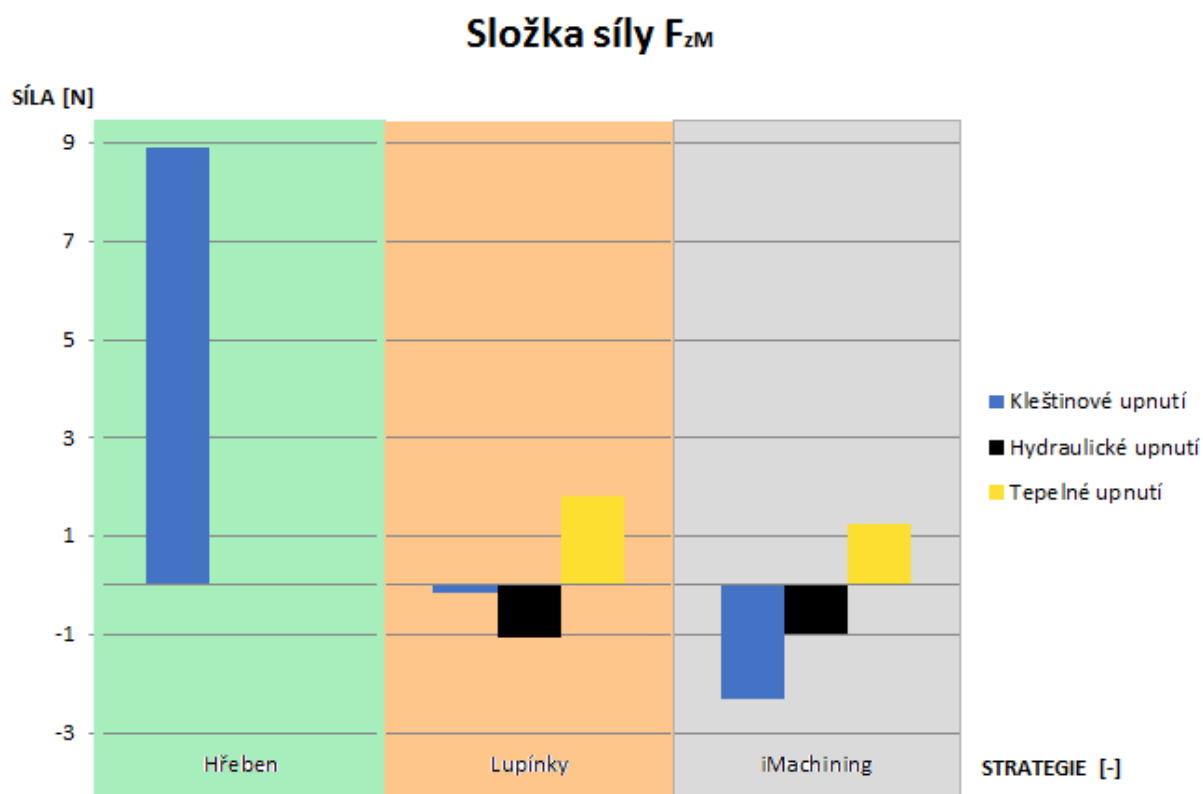
Na následujícím obrázku lze vidět graf rozptylu složky síly řezání F_{yM} . Dle grafu rozptylu složky F_{yM} , působící kolmo na směr posuvu, lze jednoznačně říci, že největších hodnot rozptylu bylo dosaženo u kleštinového upnutí a nejmenší rozkmit vykazovalo opět tepelné upnutí.



Obr. 37 – Rozkmit složky řezné síly F_{yM}

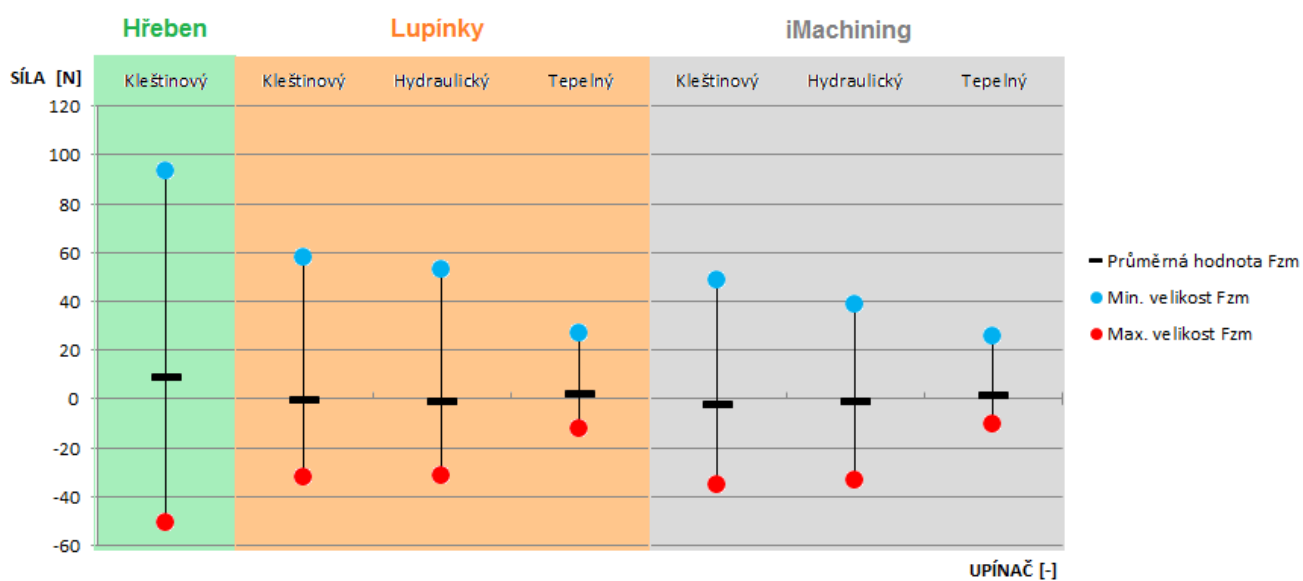
7.3. Složka řezné síly F_{zM}

Pasivní složka síly řezání působící se směru osy vřetene. Pozoruhodná je skutečnost, že směr působení síly měnil v závislosti na použitém upínači a strategii, což je vidět při srovnání strategií lupínky a iMachining. U kleštinového a hydraulického upnutí u těchto dvou strategií působila složka síly řezání F_{zM} v proti směru transformovaného systému stroje. Zatímco u tepelného upnutí byl směr působení složky F_{zM} opačný. Složka řezné síly F_{zM} byla zatěžována v porovnání se složkami F_{xM} a F_{yM} velmi málo. Největší průměrné hodnoty vykazovala opět hřebenová strategie. Druhá nejvyšší naměřená hodnota (strategie-iMachining, upínací-kleštinový), byla o 74 % menší než u hřebenové strategie. O téměř 98% nižší průměrné hodnoty složky F_{zM} bylo dosaženo při použití lupínkové strategie, kleštinového upnutí.



Obr. 38 – Průměrné hodnoty složky řezné síly F_{zM}

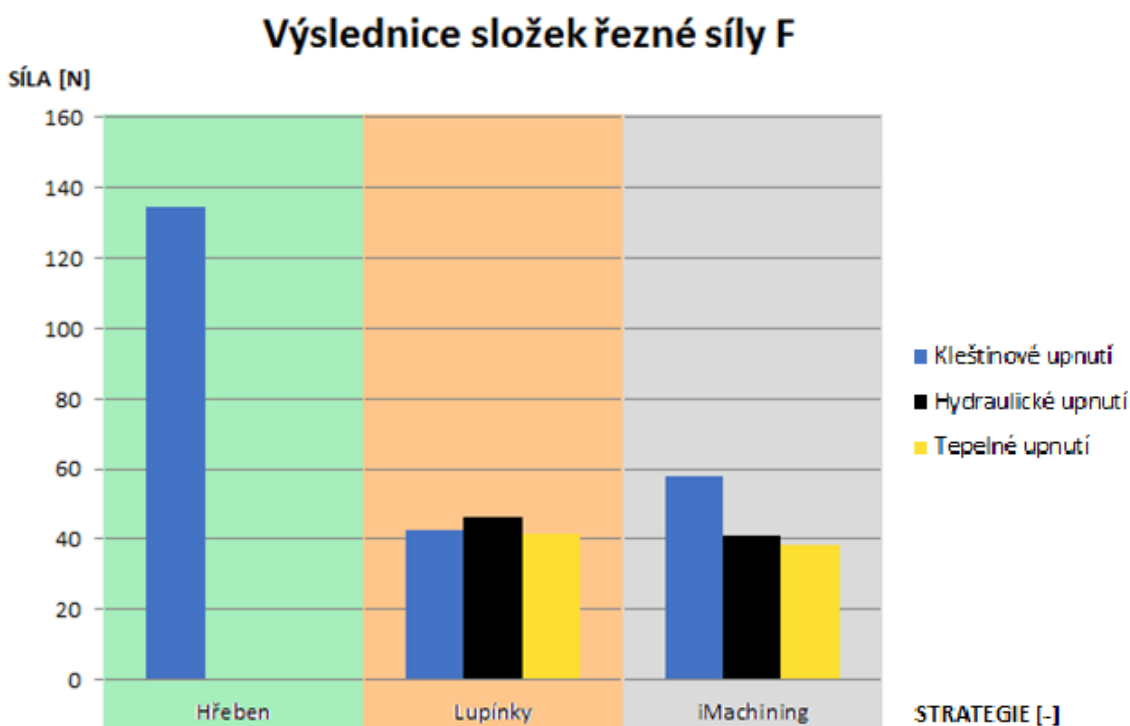
Z grafu na obr. 39 lze vyčíst, že největších hodnot rozptylu bylo dosaženo u kleštinového upnutí a nejmenší rozkmit vykazovalo tepelné upnutí. Hodnoty rozptylu jsou opět přímo úměrné průměrné velikosti dané složky síly.



Obr. 39 – Rozkmit složky řezné síly F_{zM}

7.4. Výsledná řezná síla F_v

Na směr silové výslednice mají největší vliv tangenciální a normálové složky síly. Velikost výsledné síly řezání byla spočítána z průměrných hodnot jednotlivých složek sil pomocí vztahu (2). Cílem je, aby vektor výslednice složek řezné síly F_v působil v co největší míře ve směru osy Z (tzn. osa vřetena). Tato skutečnost bohužel nebyla ověřena, jelikož se jedná o složitý výpočet. Výpočet směru působení výslednice by mohl být řešen např. v disertační práci.



Obr. 40 – Porovnání výsledné řezné síly

V následující tabulce č. 12 je vidět porovnání jednotlivých složek síly řezání. V celém průběhu změn strategií a upínačů dominuje složka F_{yM} , což je normála ke směru posuvu. Jedinou výjimkou byla strategie-iMachining, upínač-kleštinový, kde převládala složka řezné síly F_{xM} , působící ve směru rychlosti posuvu (označeno rámečkem). Velmi malých hodnot je dosaženo u složky F_{zM} .

Tab. 12-Poměr jednotlivých složek síly řezání

Strategie	Upínač	F_{xM} [-]	F_{yM} [-]	F_{zM} [-]
Hřeben	kleštinový	0,7	1	0,1
Lupínky	kleštinový	0,9	1	0,0
Lupínky	hydraulický	0,8	1	0,0
Lupínky	tepelný	0,6	1	0,1
iMachining	kleštinový	1,0	0,9	0,1
iMachining	hydraulický	0,9	1	0,0
iMachining	tepelný	0,8	1	0,0

Závěr

Diplomová práce se zabývala zvyšováním efektivity frézování volbou nejvhodnější strategie a upnutí, vzhledem k velikosti složek řezné síly. K experimentálnímu měření byl použit piezoelektrický křemíkový dynamometr Kistler 9129AA. Při experimentu nebylo zkoumáno opotřebení nástroje, proto lze závěr vyvodit pouze z velikost složek řezné síly. Jistým rozšířením diplomové práce by mohlo být i zkoumání opotřebení nástroje, kdy by na základě zvolené optimální míry opotřebení hřbetu byly vypočteny hodnoty trvanlivosti pro každou strategii.

Teoretická část byla zaměřena na rozbor problematiky sil, možnosti měření složek síly řezání a popisem jednotlivých měřících zařízení. Dále byl popsán princip piezoelektrického jevu, včetně piezoelektrických materiálů. Další kapitola je věnována zařízení na měření složek síly řezání a momentů, dynamometru Kistler 9129AA. Je detailně rozebrána oblast použití, rozměry a vlastnosti dynamometru.

Experimentální část předcházelo navržení 3 různých strategií v CAM softwaru. Následný experiment probíhal v laboratořích katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie a byl uskutečněn na pětiosém obráběcím centru DMG MORI DMU 50 2. generace. Nezbytnou součástí byla také měřící aparatura Kistler. Experimentem bylo frézování průchozích drážek různými strategiemi obrábění za pomoci různých typů upnutí nástroje. Při obrábění jednotlivých drážek bylo zapnuta měřící aparatura Kistler. Na základě silových záznamů byly později pomocí softwaru Dynoware analyzovány velikosti složek síly řezání. V experimentální části byl dále popsán princip obrábění při použití jednotlivých strategií a problémy, které se vyskytly během obrábění.

V závěrečné části jsou uvedeny grafy jednotlivých složek síly řezání včetně hodnot jejich rozptylu. Z grafů lze vyvodit vhodnost jednotlivých strategií a upnutí pro praktické využití.

Jako nejvhodnější strategie s nejmenšími velikostmi jednotlivých složek síly řezání byla vyhodnocena lupínková strategie. Jako vhodná volba je jevila i strategie iMachining, jejíž průběh byl také velmi plynulý, avšak hodnoty složek síly řezání byly nepatrně větší. Pro lupínkovou strategii hraje i fakt, že výrobní čas drážky byl cca 7% kratší, ušetření téměř 9 sekund na výrobě jedné drážky může v sériové výrobě ušetřit spoustu peněz. Jako nejméně vhodná se jeví hřebenová strategie, jejíž průběh obrábění vykazoval velké vibrace a velikost síly řezání.

Z pohledu upnutí se jako nejvhodnější volba jeví jednoznačně tepelné upnutí, které vykazovalo jak nejmenší velikosti složek síly řezání, tak i hodnoty rozkmitu jednotlivých složek řezné síly. Upnutí pomocí hydraulického upínače bylo vyhodnoceno jak vhodné, avšak rozkmit i velikost složek síly řezání byla větší než u tepelného upnutí. Ačkoliv kleštinový upínač nevykazoval např. u lupínkové strategie největší průměrnou velikost síly řezání, tak při širším úhlu pohledu byl pro obrábění nejméně vhodnou volbou.

Průměrné hodnoty u kleštinového upnutí jsou zkresleny velkým rozptylem jednotlivých složek síly řezání.

Při komplexním pohledu se jako nejlepší volba jeví strategie-iMachining, upnutí-tepelné. Další by byla lupínková strategie za použití tepelného upnutí a dále strategie-iMachining, upnutí-hydraulické. Nejméně vhodnou volbou by bylo použití hřebenové strategie za použití kleštinového upnutí a dále použití strategie-iMachining, upnutí-kleštinového.

Citace

- [1] CHARBONNAUD, P.; CARRILLO, F.; LADEVEZE, D. Monitored robust force control of a milling process. In Control Engineering Practice 9 [online]. 2001 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z [www: www.elsevier.com/locate/conengprac](http://www.elsevier.com/locate/conengprac)
- [2] Vliv vybraných parametrů procesu na řezné síly při HSC. MMspektrum [online]. 2002 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vliv-vybranych-parametru-procesu-na-rezne-sily-pri-hsc.html>
- [3] BRYCHTA, J., R. ČEP, M. SADÍLEK, L. PETŘKOVSKÁ a J. NOVÁKOVÁ. Nové směry v progresivním obrábění [online]. Ostrava: Editační středisko VŠB – TUO, 2007 [cit. 2018-04-20]. ISBN 978-80-248-1505-3. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO/texty.pdf>
- [4] Měření složek síly řezání. Homel.vsb. [online]. 2011 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_08.pdf
- [5] VASILKO, K. TEÓRIA A PRAX TRIESKOVÉHO OBRÁBANIA [online]. Prešov: Fakulta výrobných technológií Technické univerzity v Košiciach, so sídlom v Prešove, 2009 [cit. 2018-04-20]. ISBN 978-80-553-0152-5. Dostupné z: <http://www.karolvasilko.com/download/Teoria%20a%20prax%20trieskoveho%20obrabanania%202009.pdf>
- [6] Příručka pro technology – Jak je to s řeznými silami?. MMspektrum. [online]. 2016 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-je-to-s-reznymi-silami.html>
- [7] Přímé měření sil a momentů. Homel.vsb. [online]. 2011 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_09.pdf
- [8] Síla bude změřena. MMspektrum. [online]. 2016 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/sila-bude-zmerena.html>
- [9] HUNT, Andy. Guide to the measurement of force. London, 1998. ISBN 09-044-5728-1.
- [10] ČEP, R. a J. PETRŮ. Experimentální metody v obrábění [online]. Ostrava: VŠB – TUO, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2011 [cit. 2018-05-20]. ISBN 978-80-248-2533-5. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/459/ucebniopory/Experimentalni_metody_%20v_obrabeni.pdf

- [11] Odporové tenzometry. Homel.vsb. [online]. 2015 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <http://homel.vsb.cz/~jur286/mast/tenzometry.htm>
- [12] SANDVICK COROMANT. Příručka obrábění: kniha pro praktiky.1, české vyd. Překlad Miroslav Kudela. Praha: Scientia, 1997, ISBN 91-972-2994-6.
- [13] Tenzometry. Vtsz. [online]. 2016 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <http://www.vtsz.cz/polovodicove-tenzometry.php>
- [14] KOČMAN, Karel. Technologické procesy obrábění.Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [15] Analyzing and Commanding Sophisticated Machining Processes.. Kistler. [online]. 2015 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/?type=669&fid=65&model=download>.
- [16] NESLUŠAN M., TUREK S., BRYCHTA J., ČEP R., TABAČEK M., Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní. Žilina: EDIS Žilina, 2007, ISBN 978-80-8070-711-8
- [17] Základy piezoelektriny pro aplikace. Crr.vutbr. [online]. 2011 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1112.pdf
- [18] Cutting force measurement. M3.tuc. [online]. 2009 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <http://www.m3.tuc.gr/EQUIPMENT/MIKRODYNAMOMETRO/cutting%20force%20measurement.pdf>
- [19] Elektronické publikace ze školení poskytnuté firmou Kistler (více nespecifikováno)
- [20] Piezo-ceramic Sensors and Sensor Applications. Ceramtec. [online]. 2015 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <https://www.ceramtec.com/applications/piezo-applications/sensor-technology>
- [21] Tenkovrstvé piezoelektrické senzory. Fchi. [online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: https://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010359/14_senzory_QCM.pdf
- [22] Piezo technology. Piceramic [online]. 2008 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://www.piceramic.com/en/products/piezoceramic-materials/>
- [23] Základy teorie třískového obrábění [online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <http://web.sstzr.cz/download/cat1/technologie-strojního-obrabení.pdf>
- [24] Piezoelectric Materials. Thegreenage. [online]. 2013 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <http://www.thegreenage.co.uk/tech/piezoelectric-materials/>

- [25] Piezoeletrický jev. Wikipedia. [online]. 2016 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Piezoelektrick%C3%BD_jev
- [26] PiezoAplikace – Terminologie. DPS [online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/zajimavosti/id:27404/piezoaplikace-terminologie>
- [27] 3-Component Measuring System. Web.sensor. [online]. 2009 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <http://web.sensor-ic.com:8000/ZLXIAZAI/KISTLER/000-710e-04.11.pdf>
- [28] DMU 50. DMG MORI [online]. 2018 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/products/milling-machines/universal-milling-machines-for-5-sided-5-axis-machining/dmu/dmu-50-2nd-generation#Technic>
- [29] Elektronické publikace a materiály poskytnuté katedrou 346 (více nespecifikováno)
- [30] Kleštinové upínače a kleštiny. Nástroje [online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <https://www.nastroje.cz/upinani/klestinove-upinace-a-klestiny>
- [31] TENDO hydro upínače. Winter-servis [online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: http://www.winter-servis.cz/index.php?page=schunk/n_tendo
- [32] TENDO E compact. Schunk [online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: https://schunk.com/us_en/homepage/tendo-e-compact/#c3237
- [33] MFG. Force measurement [online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <http://www.mfg.mtu.edu/cyberman/quality/metrology/force.html>
- [34] KOČMAN, Karel. Technologické procesy obrábění. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.

Seznam příloh

Příloha A	Výrobní výkres-DP kostka
-----------	--------------------------

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu, panu doc. Ing. Marku Sadílkovi, Ph.D, za cenné rady při vypracovávání mé diplomové práce.

Rád bych také poděkoval své rodině a přátelům, kteří mě podporovali nejen při psaní diplomové práce, ale po celou dobu mého studia.

Také bych chtěl zmínit, že práce byla podpořena ze Studentské grantové soutěže Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava v rámci projektu SP2018/136 Specifický výzkum v oblasti obrábění a strojírenské metrologie s cílem zvýšit a podpořit vědecko-výzkumné aktivity studentů doktorských a magisterských studijních programů ve spolupráci s akademickými pracovníky.